

UniversitätsSpital Zürich
Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie
Direktor: Prof. Dr. med. Dr. med. dent. Martin Rücker

Arbeit unter Leitung von PD Dr. med. Dr. med. dent. Philipp Metzler

3D Reproduzierbarkeit anthropometrischer, kraniofazialer Landmarken am dynamischen Modell unter Verwendung eines 3D-Fotosystems

INAUGURAL-DISSERTATION
zur Erlangung der Doktorwürde der Zahnmedizin
der Medizinischen Fakultät
der Universität Zürich

vorgelegt von
Marc Philipp Lehner

Genehmigt auf Antrag von Prof. Dr. med. Dr. med. dent. Martin Rücker
Zürich 2016

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung.....	5
1.1	Zweck	5
1.2	Vorgehen	5
1.3	Resultate	5
1.4	Schlussfolgerung	6
2	Einleitung.....	7
2.1	Anthropometrie	7
3	Techniken der 3D Gesichtsvermessung.....	8
3.1	Laserscanning.....	8
3.2	3D-Fotogrammetrie	11
3.3	3D-Stereofotogrammetrie.....	13
3.4	Vor- und Nachteile der 3D-Stereofotographie	14
4	Zielsetzung.....	16
5	Material und Methode	17
5.1	Erstellung der Rohdaten	17
5.2	Datenverarbeitung.....	21
5.3	Markierung/Digitalisierung	21
5.3.1	Zuordnungstabelle der Landmarken zu den anatomischem Punkten	22
5.3.2	Gesetzte Landmarken am dreidimensionalen Kopf	23
5.4	Berechnung von Distanzen in der dritten Dimension	25
5.5	Variablen	25
5.6	Statistik	26
6	Resultate.....	27
6.1	Die Präzision.....	27
6.2	Benutzerfehler	28

6.3	Objekt-Positionierung und Rekalibration	28
6.4	Der dynamische Kinderkopf	29
6.4.1	Abweichungen der Landmarken	30
6.4.2	Landmarke 11, Alare links	31
6.4.3	Landmarke 19, Christa philtri rechts	32
6.4.4	Gesamtabweichung	33
6.4.5	Ergebnisse der einzelnen Patienten	36
6.4.6	Ergebnisse Patient 1	36
6.4.7	Ergebnisse Patient 2	37
6.4.8	Ergebnisse Patient 3	38
6.4.9	Ergebnisse Patient 4	39
6.4.10	Ergebnisse Patient 5	40
7	Diskussion	41
7.1	Bilderfassung	41
7.2	Das 5-pod Vectra 3D-System	42
7.3	Diskussion	43
7.4	Schlussfolgerung	47
7.5	Ausblick	48
7.6	Zusammenfassung	49
8	Literaturverzeichnis	50
8.1	Textquellen	50
9	Anhang	53
9.1	Messdaten Patient 1	53
9.1.1	Differenzen [mm] der Messbeträge zum Betrag der Mittelwertkoordinaten - Patient 1	58
9.2	Messdaten Patient 2	59
9.2.1	Differenzen [mm] der Messbeträge zum Betrag der Mittelwertkoordinaten - Patient 2	64
9.3	Messdaten Patient 3	65
9.3.1	Differenzen [mm] der Messbeträge zum Betrag der Mittelwertkoordinaten - Patient 3	70
9.4	Messdaten Patient 4	71

9.4.1	Differenzen [mm] der Messbeträge zum Betrag der Mittelwertkoordinaten - Patient 4	76
9.5	Messdaten Patient 5	77
9.5.1	Differenzen [mm] der Messbeträge zum Betrag der Mittelwertkoordinaten - Patient 5	82
10	Curriculum Vitae.....	83

1 Zusammenfassung

1.1 Zweck

Zunehmendes Interesse gilt dem Einsatz der dreidimensionalen Fotografie. Mit dieser Technik ist es möglich, anthropometrische Messungen zu erstellen, welche vor allem auf dem Gebiet der Anthropometrie ihre Anwendung finden. Eine hohe Präzision und Genauigkeit sind notwendig, um verlässliche Daten zu gewinnen. Aus diesem Grund sollte jedes Messsystem, vor der standardmässigen Einführung, hinsichtlich Präzision und Genauigkeit validiert werden. Ziel dieser Studie war anhand eines Versuches die Untersuchung der Reproduzierbarkeit und Genauigkeit von anthropometrischen Messungen unter Verwendung eines 3D-Fotosystemes am dynamischen Modell.

1.2 Vorgehen

Aus einer Datenbank der Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie des Universitätsspitals Zürich wurden zufällig 5 Kinder mit einer lagebedingten Schädeldeformation ausgewählt. Alle Kinder wurden mit dem 5-pod 3D-Fotosystem (3D Vectra: Canfield, Fairfield, New Jersey, USA) digitalisiert. Im Bereich des Schädels wurden 21 Landmarken gesetzt und durch einen Untersucher jeweils zehnmal digital vermessen. Die Berechnung der Distanzen erfolgte durch Verwendung der euklidischen Abstandsformel im dreidimensionalen Raum. Anschliessend wurden durch statistische und graphische Auswertung die Präzision und Genauigkeit bestimmt.

1.3 Resultate

Werden 21 definierte Landmarken, welche über die kraniofaziale Region innerhalb einer Patientengruppe von 5 Kindern verteilt sind, verglichen, lassen sich folgende Resultate feststellen:

Die drei grössten Abweichungen sind der Reihe nach in den folgenden Landmarken: Alare links > Opisthocranium > Tragon links zu finden. Bei all diesen Landmarken liegen die totalen Abweichungen, innerhalb der Datensets, über einem Wert von 0.47 mm zum Mittelwert. Ein Vergleich innerhalb der Landmarken lässt erkennen, dass die Landmarke Alare links mit einer Differenz (Total Diff) von 0.52 mm die grösste Abweichung aufweist. Innerhalb der prozentualen Verteilung sämtlicher Landmarken (100%) liegt, mit einem Anteil von 4.76%, die Landmarke Alare links als einzige im Bereich, welcher mehr als 0.5 mm Total Diff aufweist. Im Vergleich dazu sind mit einer Abweichung im Teilbereich zwischen 0.4 mm und 0.5 mm die Landmarken Opisthocranium und Tragon bei 9.52% angesiedelt. Die $(\text{Total Diff})_{5+6}$ der Landmarken über 0.4 mm beträgt somit 14.26% des gesamten Anteils der Landmarken, welche zusammen 100% umfassen. Die geringen Abweichungen der anderen Landmarken erlauben eine präzise und reproduzierbare Messung auch im klinischen Umfeld.

1.4 Schlussfolgerung

Die aktuelle Untersuchung zeigt, dass das verwendete 3D-Fotosystem aufgrund der Genauigkeit, der Präzision sowie der Reproduzierbarkeit für anthropometrische Studien geeignet ist. Die kurzen Aufnahmezeiten, im Bereich von Millisekunden, ermöglichen das Erstellen von detailgetreuen digitalen Bildern auch bei bewegten Objekten.

2 Einleitung

2.1 Anthropometrie

Unter Anthropologie verstehen wir die Wissenschaft des Menschen sowie dessen Erkenntnisse über sich selbst. Die Anthropologie wird als ein aus vielfältigen Teilen und Ideologien bestehendes Konstrukt aufgefasst und findet sich in verschiedenen einzelnen Wissenschaften wieder. Dazu gehören die Biologie, Medizin, Theologie, Pädagogik, Psychologie und viele weitere Fachdisziplinen.

Die Anthropometrie wird als Teilgebiet der Anthropologie behandelt und beschäftigt sich mit den Massen und Dimensionen des menschlichen Körpers. Vielfach werden Erkenntnisse der Anthropometrie zur Gestaltung von Alltagsgegenständen genutzt, welche optimal auf unsere Körper abgestimmt sein sollen. Ein Beispiel hierzu ist die Ergonomie eines Stuhls am Arbeitsplatz, aber auch die Definition der Normgrößen einer ganzen Bevölkerung gehört zu einer Reihe anthropometrischer Erkenntnisse der letzten Jahrhunderte. Eines der ältesten Beispiele anthropometrischer Vermessung vermittelt die Zeichnung des vitruvianischen Menschen durch Leonardo da Vinci.

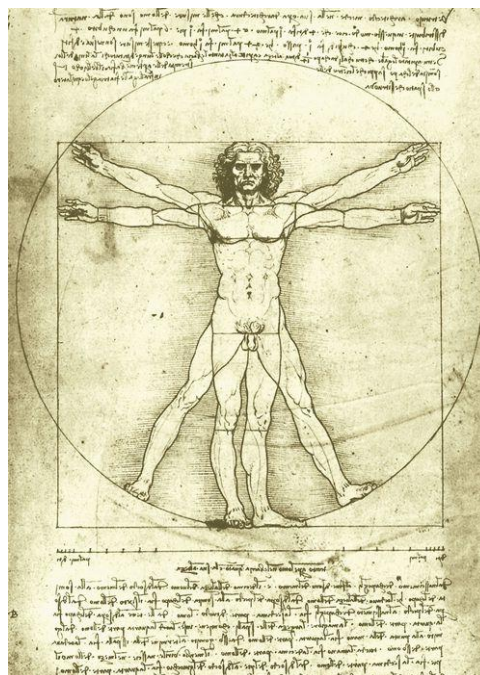


Bild 1: Der vitruvianische Mensch von Leonardo da Vinci¹

In der Medizin bietet sich die Anthropometrie als leistungsstarkes Medium für die Bestimmung von morphologischen Aberrationen an. Die Möglichkeit, solche Aberrationen zu vermessen,

¹ <http://www.zeno.org/Kunstwerke/B/Leonardo+da+Vinci%3A+Proportionsstudie+nach+Vitruv>, zuletzt besucht am 13.04.2014

kann für die Wahl einer geeigneten Therapieform von wesentlicher Bedeutung sein. Während sie in der anamnestisch-diagnostischen Abklärungsphase ein wichtiges Entscheidungskriterium ist, was die zu wählende operative Vorgehensweise anbelangt, kann sie in der postoperativen Phase ein nützliches Mittel sein, um das Resultat der angestrebten Lösung zu überprüfen.

Ein wichtiges Kapitel innerhalb der Anthropometrie ist die anthropometrische Bestimmung von Kindern und Säuglingen mit angeborenen Wachstumsanomalien (14, 15, 24, 38). Als Referenz dient der von Farkas publizierte Atlas über die Anthropometrie an Kopf und Gesicht (10). Farkas hat für seinen Atlas eine Vielzahl von Probanden manuell vermessen und protokolliert. Der Atlas beinhaltet standardisierte, anatomisch korrekte Markierungen des Schädels, Mittelwerte unterschiedlicher Parameter, Proportionen sowie wichtige Indizes. Das Nachschlagewerk, das auch als normative Datenbank aufgefasst werden kann, dient der Berechnung von standardisierten (z-) Auswertungen, basierend auf dem Alter, dem Geschlecht und ethnischen Charakteristika. Die Ausmessung eines durch Wachstumsanomalien deformierten Schädels erfolgt vor- und nach einer therapeutischen Intervention. Die vor einer Behandlung erhobenen Daten sind massgeblich für die Wahl einer geeigneten Therapieform. Der Vergleich mit den standardisierten Werten von Farkas erlaubt einen objektiven Bezug zum Ergebnis einer Therapie. Mit dem von Farkas publizierten Atlas kann ein Vergleich zwischen den Ergebnissen von unterschiedlichen, chirurgischen Techniken wie auch die Anwendung dieser Techniken in Bezug auf die Altersabschnitte etc. erfolgen (12, 13, 16, 22, 23, 25, 39, 40).

3 Techniken der 3D Gesichtsvermessung

3.1 Laserscanning

Unter Laserscanning versteht man die Abtastung einer Oberfläche mittels eines Laserstrahls, die Detektion der sich reflektierenden Strahlung und die anschliessende Auswertung der entstandenen Datensets. Die als sehr präzise eingestufte Methode der Laserscanning von Oberflächen beruht auf einem optischen Prinzip, welches die Eigenschaften von gebündeltem Licht in Form eines Laserstrahls, welcher auf eine Oberfläche X trifft, ausnutzt (30). Mittels einer Laserquelle werden Strahlen auf eine Oberfläche projiziert. Diese werden durch einen Detektor in Form einer Kamera aufgenommen und deren Verzerrungen durch ein entsprechendes Programm in 3D-Datensets umgewandelt. Diese Datensets lassen, in einer dafür konzipierten Software, die Oberflächenmuster des gescannten Objekts wiedergeben. Eine trianguläre Anordnung von Kamera und Laser ermöglicht die Berechnung der Tiefe. Die Darstellung der Daten erfolgt im dreidimensionalen Raum, in Form von x-, y-, und z-Koordinaten (Bild 2).

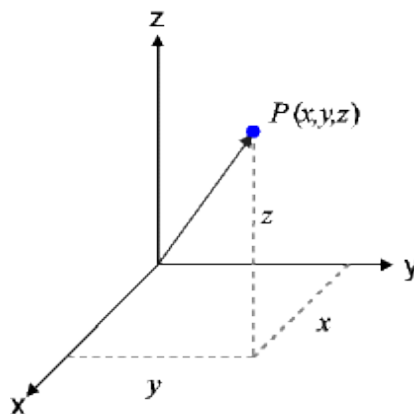


Bild 2: Kartesisches Koordinatensystem mit x-, y und z-Achse, welche zusammen die Koordinate von Punkt $P_{(x,y,z)}$ definieren ²

Da bei der Laserscanning-Methode ein Laserstrahl Daten über eine grössere Fläche aufnehmen soll, wird der Untergrund mittels eines Streifenscans abgefahren. Die Erstellung eines solchen Datenscans erfordert in unterschiedlichem Mass Zeit, da sich während des Scanverfahrens entweder der Laser um das Objekt (beispielsw. Oberflächenscan eines Meeresgrundes oder Bodyscanner) oder vielfach das zu scannende Objekt vor dem Laser (z. B. Scanning von Kunstgegenständen aus der Antike oder Gesichter) dreht. Aus diesem Grund eignet sich die Laserscanning-Methode vorwiegend bei statischen Objekten, welche unbeweglich als Vorlage dienen. Das Scannen eines menschlichen Kopfes, im Folgenden dem eines Kindes, der fast immer eine gewisse Dynamik in seinem Muskelspiel aufweist, erweist sich daher als nicht ganz einfach und die Methode als eher unpraktisch. Die Problematik besteht dabei in Form von Bewegungsartefakten wie zum Beispiel Verzerrungen, welche die präzise Bestimmung einzelner Datenpunkte/ Landmarken verunmöglicht. Eine Möglichkeit diesen Datenverlust auf ein Minimum zu reduzieren, ist, das zu untersuchende Objekt in seiner Bewegung zu minimieren. Eine Variante im Falle des Kindes wäre, dieses in Kurzanästhesie zu legen, was aber unverhältnismässig erscheint in Bezug zur zu verrichtenden Datenerfassung und den ebenfalls bestehenden Risiken einer Anästhesie. Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Zeit, in der das Scanverfahren abläuft, zu verringern. Dazu braucht es schnellere Datenerfassungsmöglichkeiten, bessere Lasersysteme und Rechner mit einer höheren Umsetzungsrate. Diese Punkte wurden in den letzten Jahren immer wieder verbessert, sodass heute auch Systeme auf dem Markt existieren, welche durchaus für qualitativ hochwertige Scanverfahren gebraucht werden können.

Laserscanning Einheiten wie die Minolta Vivid 900 (910) (Osaka, Japan), welche gängige Verwendung findet, sind als Stereopaare installiert. Studien haben die Exaktheit der Minolta Scan-

² <http://www.physik.uni-wuerzburg.de/video/Vorlesung1/Kapitel3/linbew/Vorl31.htm>, zuletzt besucht am 26.10.2014

ner 700 und 900 hinlänglich belegt (28, 36). Die Scanner weisen eine Genauigkeit von 1.9 mm \pm 0.8 mm beziehungsweise 1.21 \pm 0.3 mm auf. Die Exaktheit wird in den Studien mit 0.56 \pm 0.25 mm für die Minolta 900 angegeben. Der Fehler, durch die computergesteuerte Registrierung des Links- bzw. Rechts-Scans bedingt, liegt bei 0.13 mm \pm 0.18 mm. Kau et al. (20) führte in seiner Studie eine Beurteilung der 3D-Messung der Gesichtsmorphologien von Kinderköpfen durch. Die Vermessung der Köpfe erfolgte durch zwei hochauflösende Minolta Vivid 900- Kameras (Osaka, Japan), welche beide mit einem Laser (Klasse 1) zur Bestimmung des Kamera-Objekt-Abstandes ausgerüstet waren. Patienten wurden in einem definierten Abstand von 1350 mm vor einen Spiegel gesetzt. Der Spiegel wurde mit einer Positionierhilfe (Fadenkreuz) zur optimalen Einstellung der Kopfhöhe versehen. In der definierten Methode sind Kameraabstand und -winkel zum Objekt bekannte Größen. Die Aufzeichnung wurde in einem Schnellscanmodus von 0.3 Sekunden pro Scan durchgeführt. Bei der Aufnahme wurden jeweils die linke und die rechte Gesichtshälfte getrennt aufgenommen, zusammengefügt und entstandene Abweichungen untereinander verglichen.

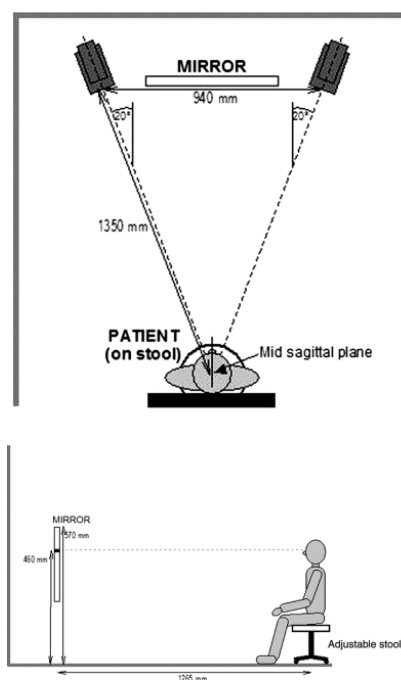


Bild 3: Kameraaufstellung und Patientenpositionierung (20)

Kau et al. kam zum Ergebnis, dass die Minolta 900 zuverlässige Einschätzungen erlaubt was die morphologischen Veränderungen der Gesichtsbereiche der Kinder infolge Wachstum oder klinischer Interventionen anbelangt.

Bereits frühere Arbeiten (18) schrieben der Laserscanning Methode eine Genauigkeit von fast 0.5 mm zu. Im Vergleich dazu führten die Laserscanningtomographie und die Stereofotogrammetrie in der 3D optic disc Analyse zu vergleichbaren Resultaten.

3.2 3D-Fotogrammetrie

Unter der 3D-Fotogrammetrie versteht sich die Erstellung eines dreidimensionalen Objekts mittels Fotografie. Mit Hilfe dieser Technik ist es möglich, die räumliche Lage und Form eines Objekts zu bestimmen.

Die Technik der Fotogrammetrie wurde in der Zahnmedizin der 1940er Jahre erstmals verwendet und hat bis heute Beständigkeit. Das Verfahren der Messung und Erfassung von 3D Daten erfolgt in Form der sogenannten Triangulationsvermessung (6, 41).

Im Fall der Vermessung von Oberflächenstrukturen wurde ein Lichttraster auf die zu vermessende Oberfläche projiziert. Das auf die Oberfläche auftreffende Licht wird entsprechend dem Relief der Oberfläche unterschiedlich gebrochen, wodurch das zu erzeugende Lichttraster gebogen oder deformiert wird. Durch die Aufstellung einer zweiten Kamera x_2 mit vordefiniertem Abstand y zur ersten Kamera x_1 und einem bestimmten Winkel α zum Lichttraster kann die Information in ein 3D-Datensatz umgerechnet werden (Bild 4).

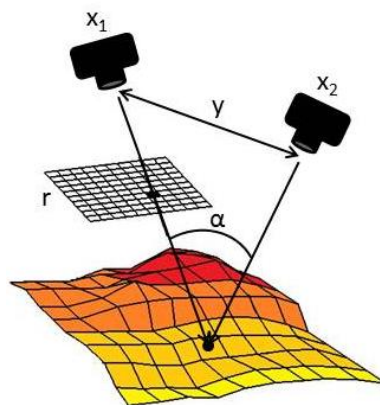


Bild 4: Rasteraufnahme in der 3D-Fotogrammetrie

Erst die Standardisierung und Modifikation dieser Technik ermöglichte es, vergleichbare, präzise anthropometrische Messungen entsprechend der direkten Methode zu erstellen.

Eine weitere Methode zur Erstellung von 3D-Bildern war in Form der Moiré-Technik, die von Tasaki um 1970 entwickelt wurde und mit strukturiertem Licht topographische Linien erzeugte. Ein durch eine Lichtquelle bestrahltes Objekt, welches zwischen Lichtquelle und Objekt zwei Gitter aufweist, erfährt eine Projektion von Gitterlinien auf seiner Oberfläche. Die durch die Gitter betrachteten Linien lassen das Objekt mit Moiré-Figuren überzogen scheinen (Bild 5). Das durch Höhenschichtlinien überzogene Objekt wird fotografiert und anschliessend auf einem Monitor abgebildet. Dabei muss die Kamera in der gleichen Ebene wie die Lichtquelle liegen

und entsprechend gleich weit von der Lichtquelle entfernt sein, um die Höhenlinien korrekt darzustellen. Aus diesen werden schliesslich die nötigen Masszahlen ermittelt (19).

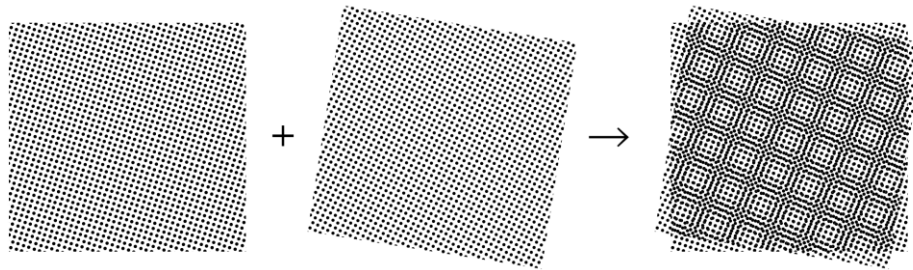


Bild 5: Moiré-Figuren entstanden durch zwei übereinander gelegt Gitter ³

Die anfänglichen Versuche mit 3D-fotometrischen Aufnahmen hatten den negativen Aspekt, einerseits ungenau, andererseits technisch sehr anspruchsvoll und umständlich zu sein. Im Vergleich dazu sind die neusten installierten Modelle für die Bestimmung digitaler 3D-Aufnahmen den alten weit überlegen. Der heutige Stand der Technik umfasst die Erstellung von hochauflösenden digitalen 3D-Fotos. Mit Unterstützung der nötigen Soft- und Hardware lassen sich heute mit wenigen Mausklicks hochpräzise Fotos generieren und vermessen.

In der Literatur beschriebene Beispiele der digitalen 3D-Fotometrie sind die Fiore 3D range camera (NEC Italia, Via Leonardo da Vinci 97, 20090 Trezzano S/N, Milano, Italien), das C-3D Imaging SystemTM (Ferranti, Birmingham, UK), Genex 3D Rainbow Systems (Genex 3D Technologies Inv., 120605 Concord Street, Suite 500, Kensington, Maryland, USA), DSP400 SystemTM (3dMD Inc., 100 Galleria Parkway, Suite 1070, Atlanta, Georgia, USA), und das 3d-MDface SystemTM (3dMD Inc., 100 Galleria Parkway, Suite 1070, Atlanta, Georgia, USA) (1–4, 27, 31, 44–47).

³ <http://de.wikipedia.org/wiki/Moir%C3%A9-Effekt#mediaviewer/File:Moir%C3%A92.png>, zuletzt besucht am 04.01.2015

3.3 3D-Stereofotogrammetrie

Die Weiterentwicklung des zweidimensionalen Fotoanalyseverfahrens resultiert in den Möglichkeiten der dreidimensionalen Stereofotogrammetrie: Das 3D-Verfahren, welches spezifisch auch zu Vermessung von menschlichen Gesichtern verwendet wird, eignet sich sehr gut für diese Art der Vermessung, da es die Probleme und damit Einschränkungen des bereits angesprochenen Laserscanningverfahrens deutlich einschränkt oder gar eliminiert. Die Technologie der 3D-Stereofotogrammetrie wurde massgeblich durch die Arbeit von Burke et al. (7) geprägt und weiterentwickelt.

Spezifisch an der Methode der 3D-Stereofotogrammetrie ist ein auf das zu untersuchende Objekt projiziertes Lichtmuster, welches durch ein Minimum an zwei Kameras aufgenommen wird. Um die dritte Dimension darstellen zu können, werden die Kameras in verschiedenen Positionen aufgestellt und die durch die Datenerfassung erhaltenen Punkte werden durch Triangulation im Computer rekonstruiert und zu einem dreidimensionalen Bild zusammengefügt (Bild 6) (21).

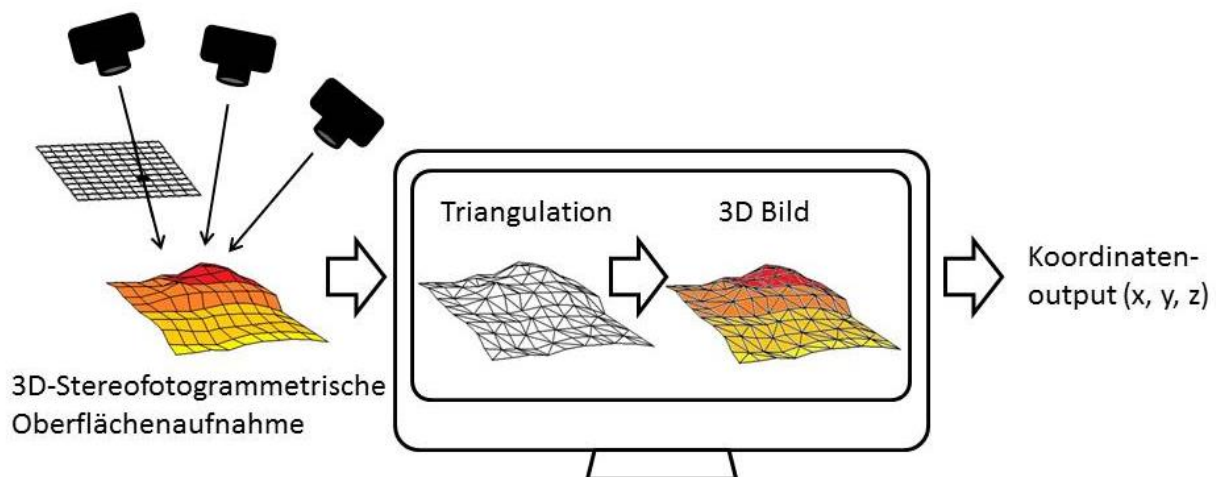


Bild 6: Methode der 3D-Stereofotogrammetrie durch Datenerfassung, Rekonstruktion mittels Triangulation und Erstellung des virtuellen 3D-Bildes. Aus dem 3D-Bild können sämtliche Punkte P als Koordinaten $P = (x, y, z)$, ausgelesen werden.

Die Bilddaten ergeben sich aus einem Datensatz an berechneten Punkten, welche in einem Koordinatensystem mit x-, y-, z-Achse dreidimensional dargestellt werden. Durch die fixe Positionierung der Punkte können deren Koordinaten sowie die Strecken zwischen den einzelnen Punkten ermittelt werden. Mit sogenannten Landmarken kann der Benutzer am Computer die jeweiligen punktspezifischen Koordinaten markieren und deren Daten auslesen. Diese Arbeit erfolgt mittels eines Softcursors, welcher sich den im Koordinatensystem abgebildeten Formkonturen selbständig anpasst und das Markieren erleichtert. Gesetzte Landmarken werden als

farbige Punkte mit fortlaufender Nummerierung angezeigt. Die den Punkten entsprechenden Bezugskoordinaten können mit wenig Aufwand ermittelt und für die spätere Vermessung von interpunktuellen Strecken exportiert und gespeichert werden.

3.4 Vor- und Nachteile der 3D-Stereofotographie

Vorteil der 3D-Fotographie ist die präzise Abbildung der Oberfläche und damit der Weichgewebestrukturen des Kopfes. Die Aufnahmen erfolgen innerhalb von Bruchteilen einer Sekunde (i.d.R. im Bereich von 2 Millisekunden).

Bei der 3D-Fotographie wird keine Röntgenstrahlung verwendet. Die 3D-Fotographie erweist sich daher als hervorragende Technik hinsichtlich anthropometrischer Untersuchungen, besonders bei pädiatrischen Patienten (9).

Ein weiterer Punkt ist die zeitliche Dauer der Messungen. Die meist im Sekundenbereich liegenden „manuellen Messverfahren“ setzen einen ruhig liegenden Körper voraus, um möglichst präzise Daten zu generieren, was vor allem bei Säuglingen und Kindern äusserst schwierig ist. Anästhesien im Kindes- und speziell im Säuglingsalter sind riskant und sollten, falls möglich, vermieden werden.

Die auf dem Markt erhältlichen 3D-Fotosysteme sind in der Lage, innerhalb von Millisekunden exzellente 3D-Bilder einer Oberfläche zu erstellen. Durch diese sehr kurze Aufnahmezeit, während einer oder mehrerer Messungen, ist die Mitarbeit der Patienten von untergeordneter Bedeutung. Es können ohne Probleme auch grössere Datensets oder Mehrfachmessungen aufgenommen werden.

Ein grosser Vorteil der 3D-Fotographie sind die elektronischen Daten, welche einfach archiviert werden können, die immer genauer werdende Darstellung der Oberflächenstrukturen und die einfache Handhabung der Datensets für retro- oder prospektive Studien wie auch für die klinische Diagnostik.

Viele Daten der Literatur beziehen sich auf Studien, welche das Gebiet der Lippen-, Kiefer-, und Gaumenspalten sowie kraniofazialen Anomalien betreffen (8, 11, 25, 48). In diesen Studien werden unterschiedliche Techniken beschrieben sowie deren Vor- und Nachteile diskutiert. Die Vielfalt dieser Studien hat bis jetzt, auf Grund der vielen unterschiedlichen Studienarten und Datenerfassungsmethoden, noch keine zuverlässigen Vergleiche ermöglicht. Mit der 3D-Fotographie könnte dieses Problem der Vergangenheit angehören und das Ziel der individuellen Behandlungsmöglichkeit von Anomalien in Kombination mit massgeschneiderten Behandlungsstrategien einen Schritt näher rücken.

Die Vorteile der 3D-Fotographie liegen auf der Hand. Da es sich bei den Apparaturen jedoch meist um sehr kostspielige Produktlösungen handelt, ist deren Verbreitung und die damit verbundene Ausschöpfung des in dieser Technik schlummernden Potenzials in den meisten Klini-

ken noch nicht sehr weit fortgeschritten. Schwierigkeiten seitens der Aufnahmen bestanden ebenfalls darin, dass transparente, schattige, aber auch glänzende Oberflächen sehr schlecht zu vermessen sind. Auch die Möglichkeit der Detektion von knöchernen Bezugspunkten kann im Moment nur in Kombination mit Computertomographie-Daten erfolgen. Diese führen zu einer erhöhten Strahlenbelastung, was natürlich, wenn immer möglich, vermieden werden soll. Ein weiterer Negativpunkt ist das Fehlen von sogenannten Normwert-Datenbanken für digitalisierte Aufnahmen. (1, 29, 45).

4 Zielsetzung

Jedes Messsystem sollte in Bezug auf dessen Präzision und Zuverlässigkeit evaluiert werden. Verschiedene Studien wurden auf diese Parameter mit verschiedenen 3D-Fotosystemen fokussiert. Dennoch gab es bisher keine Erkenntnisse, welche durch die Anwendung des uns verfügbaren 5-pod 3D-Fotosystems (3D Vectra: Canfield, Fairfield, New Jersey, USA), 360° Oberflächenkonturaufnahmen des kraniofazialen Bereichs beschreibt.

In der vorliegenden Versuchsanordnung soll die Reproduzierbarkeit und die Genauigkeit von Messungen mittels des 3D VECTRA Fotosystems 360° (Canfield, Fairfield, New Jersey, USA) ermittelt werden. Es werden bereits existierende Daten von Kindern, welche mit dem 3D VECTRA Fotosystem (Canfield, Fairfield, New Jersey, USA) fotografiert wurden, ausgewertet. In dem Untersuch gilt es, Abweichungen innerhalb der einzelnen Landmarken und der interpunktuellen Distanzen zu erfassen und mögliche Ursachen für diese zu finden.

5 Material und Methode

Der vorliegende Versuch bestand aus dynamischen Aufnahmen, d.h. Aufnahmen, welche an beweglichen Objekten bei einer zuvor definierten Zielgruppe durchgeführt wurden. Bei dieser Zielgruppe handelt es sich um Kinder mit einem maximalen Alter bis drei Jahre. Es handelt sich um Patienten der Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie, Universitätsspital Zürich, welche auf Grund einer morphologischen Abklärung mittels dem 3D VECTRA Fotosystem (Canfield, Fairfield, New Jersey, USA) dreidimensional vermessen, photographisch aufgenommen und in der institutseigenen Datenbank erfasst wurden. Aus Datenschutzgründen werden die Kinder in dieser Studie nur mit Patient 1, Patient 2, usw. bezeichnet. Auf das Geschlecht wurde nicht näher eingegangen. Die Zielgruppe wurde bewusst sehr jung gewählt, da in dieser Lebensphase die Wahrscheinlichkeit von unkontrollierten und unbewussten Kopf- und Gesichtsbewegungen sehr hoch ist. Für diese Studie wurden fünf Patienten per Zufallsverfahren aus dem vorhandenen Patientenkollektiv der Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie, Universitätsspital Zürich, ausgewählt. Für die Messungen wurden die 3D-Gesichter an 21 anatomischen Landmarken, vorwiegend in der frontofazialen Schädelregion markiert. Sämtliche Messungen wurden durch einen Untersucher vorgenommen und in zehnfacher Bestimmung erstellt. Es wurden insgesamt 210 Messpunkte aufgenommen, was einer Gesamtmenge von 1050 Messpunkten, bezogen auf alle fünf Köpfe, entspricht.

5.1 Erstellung der Rohdaten

Vor der Datenerfassung wurden die Kinder fotografiert und die Daten in die Datenbank des USZ (Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie, Universitätsspital Zürich) übermittelt.

Um die Daten zu erfassen, wurde ein Aufnahmegerät verwendet, welches über ein Kamerasystem mit fünf um das Aufnahmeobjekt angeordneten Kameras verfügt, was für den 3D-Effekt wichtig ist. Bei der Apparatur handelt es sich um das 3D VECTRA Fotosystem (Canfield, Fairfield, New Jersey, USA).

Vor der Erstvermessung eines Kindes wurde das Kamerasystem justiert, validiert und kalibriert. Zur Erstellung der Rohdaten wurden die Kinder in einen im Sichtfeld der fünf Kameras stehenden Stuhl gesetzt (Bild 7). Der Stuhl bietet den Vorteil, die Kinder möglichst an Ort und Stelle zu halten. Der Kopf des Kindes ist im Aufnahmebereich zentriert positioniert. Um die Schädelkontur im Haarbereich möglichst präzise abzulichten, werden den Probanden eng anliegende Strümpfe über den Kopf gezogen (Bild 8, 11, 12, 13). Das auftragende Deckhaar wird damit flach gedrückt.



Bild 7: 3D VECTRA Fotosystem (Canfield, Fairfield, New Jersey, USA);
Erstausrichtung der Kameras an einem vorgängig platzierten
Modellkopf.

Die Datenerfassung erfolgte durch denselben Untersucher und wurde an unterschiedlichen Tagen durchgeführt, um einen klinischen Follow-up zu simulieren. Insgesamt wurden bei den Kindern mit 21 Landmarken 210 Distanzen bestimmt (Bild 8). Es wurden fünf Kinder nach dem Zufallsprinzip ausgewählt und die Messungen pro Kopf in zehnfacher Bestimmung erhoben (Bild 9).

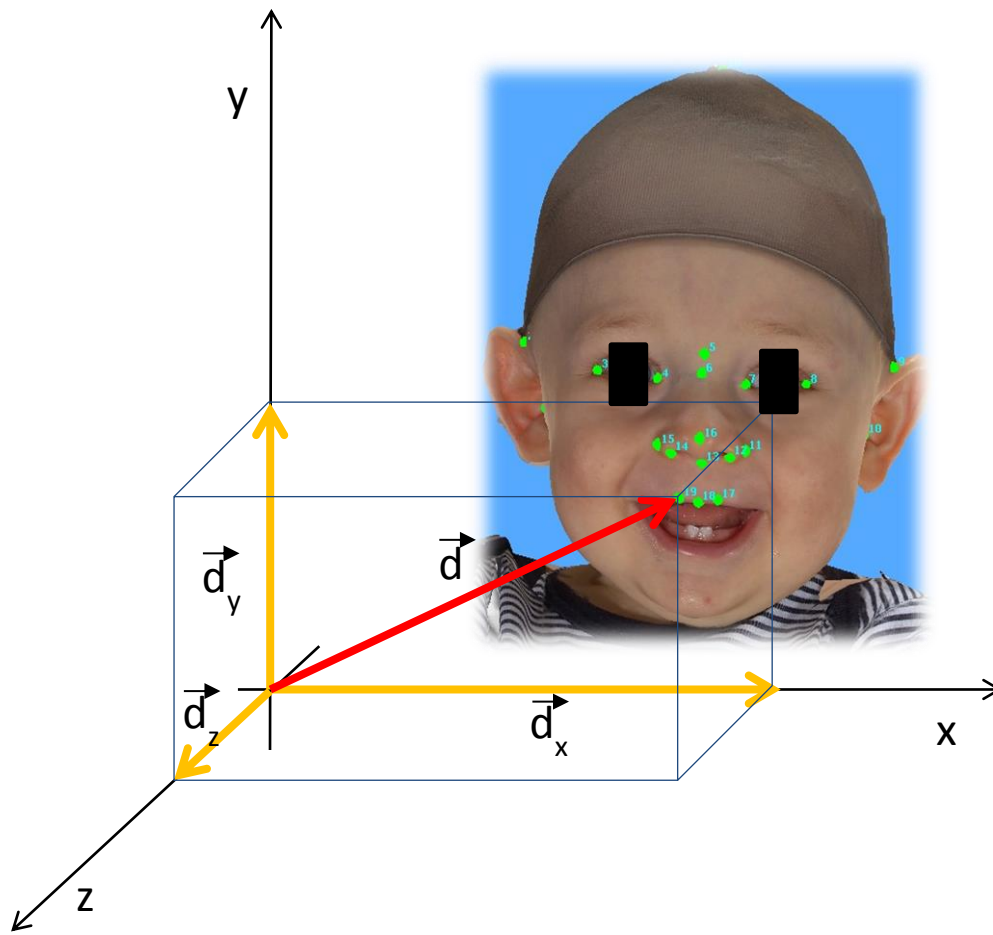


Bild 8: Aus dem in einem dreidimensionalen Koordinatensystem liegenden Patientenkopf lassen sich die gesetzten Landmarken mittels Software (Mirror, Canfield, Fairfield, New Jersey, USA) als x-, y- und z-Koordinate darstellen. Vektor d entspricht in unserem Beispiel der Distanz der Nullkoordinate zur Landmarke 19 (d_x , d_y , d_z), Crista philtri rechts.

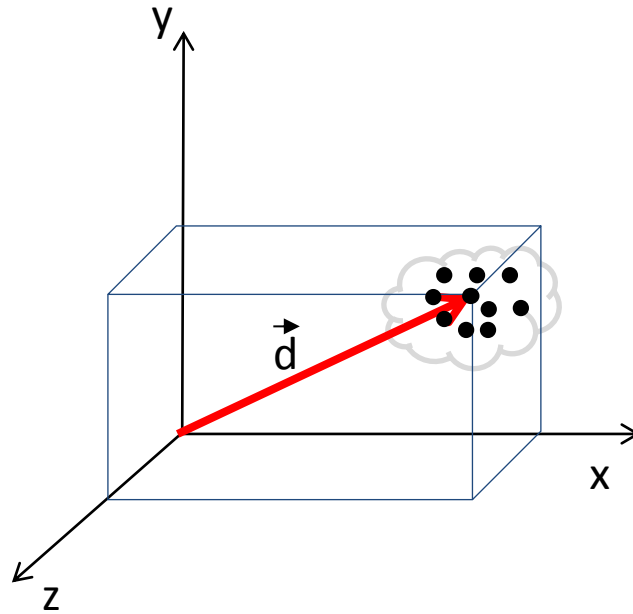


Bild 9: Die Mehrfachbestimmung einer Landmarke kann als Kugelwolkenmodell dargestellt werden, welches abhängig ist von der Präzision und Richtigkeit der durchgeführten Messungen.

Die definitive Strecke wurde aus dem Mittelwert der zehn gemessenen Strecken erstellt (Bild 10).

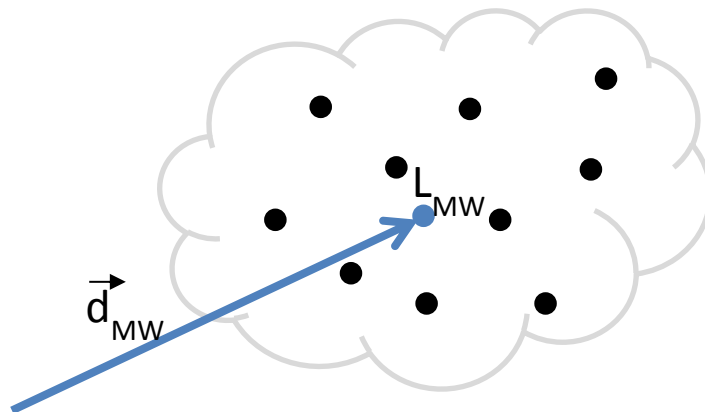


Bild 10: Das in zehnfacher Messung bestimmte Landmarken-Kugelwolkenmodell enthält eine Mittelwertlandmarke L_{MW} bestehend aus den Koordinaten L_{MW} (x_{MW} , y_{MW} , z_{MW}).

5.2 Datenverarbeitung

Die Verarbeitung der Rohdaten wurde auf einem Standard Desktop-Computer durchgeführt. Um die Daten der Bilder dreidimensional darzustellen, kam die entsprechende Bildsoftware (Mirror, Canfield, Fairfield, New Jersey, USA) des 3D-Fotosystems zum Einsatz. Dazu mussten den einzelnen Markierungen die jeweiligen x-, y- und z-Koordinaten zugeordnet und aus den erhaltenen Daten neue Datensets erstellt werden. Die Datensets bezogen sich auf eine Kopfposition, nämlich die variable Position des Kinderkopfes während der Aufnahme, die entscheidend war. Bei den pädiatrischen Patienten wurden pro Kopf zehn Datensets erstellt, welche durch einen Untersucher erhoben wurden.

Um die Genauigkeit und damit die Präzision des Setzens der Landmarken zu erhöhen, wurde jeweils die Zoom-in und -out Funktion sowie die Drehfunktion der Bildsoftware (Mirror, Canfield, Fairfield, New Jersey, USA) verwendet.

Für die weitere Auswertung und die anschliessende Evaluation der Datensets, wurden diese in eine Excel®-Datei für Mac 2011 (Microsoft® Corporation, Redmond, Washington, USA) exportiert. Die Datensets umfassen jeweils die x-, y- und z-Koordinaten der einzelnen Landmarken.

5.3 Markierung/Digitalisierung

Beim Untersuchen der Probanden in der vorliegenden Arbeit wurden die Markierungen am Computer von Hand gesetzt und anschliessend über die Software Mirror (Canfield, Fairfield, New Jersey, USA) in digitale Koordinaten umgewandelt. Hier wurden die einzelnen Landmarken auf Grund vorgängig ausgewählter, für diese Studie relevanter, anatomischer Punkte, entsprechend nach Farkas (10) gesetzt. Das Setzen von Landmarken erfolgte jeweils per Mausklick am Computerbildschirm und konnte mittels Zoom- und Rotationsfunktion angepasst werden.

5.3.1 Zuordnungstabelle der Landmarken zu den anatomischen Punkten

Die in Tabelle 1 beschriebenen Landmarken entsprechen den im Untersuch gesetzten Datenpunkten, welche in der Software Mirror (Canfield, Fairfield, New Jersey, USA) in digitale Koordinaten umgewandelt wurden.

Landmarke	Anatomischer Punkt
1 (a)	Tragion rechts
2 (b)	Otobasion superius rechts
3 (c)	Exocanthion rechts
4 (d)	Endocanthion rechts
5 (e)	Glabella
6 (f)	Soft Nasion
7 (g)	Endocanthion links
8 (h)	Exocanthion links
9 (i)	Otobasion superius links
10 (j)	Tragion links
11 (k)	Alare links
12 (l)	Alar Curvatur Punkt links
13 (m)	Subnasale
14 (n)	Alar Curvatur Punkt rechts
15 (o)	Alare rechts
16 (p)	Pronasale
17 (q)	Crista philtri links
18 (r)	Labiale superius
19 (s)	Crista philtri rechts
20 (t)	Vertex
21 (u)	Opisthocranium

Tabelle 1: Beschreibung der anatomischen Punkte, welche mit den im Untersuch gesetzten Landmarken korrelieren.

5.3.2 Gesetzte Landmarken am dreidimensionalen Kopf

Die für den Untersuch relevanten Landmarken wurden virtuell am Kinderkopf gesetzt. An den nachfolgenden Beispielbildern (Bild 11, 12 und 13) erkennt man die Landmarken in Form von grünen Datenpunkten, welche mit der jeweiligen Landmarkennummer versehen sind.

Beispiel der 21 gesetzten Landmarken anhand der folgenden Ansichten:

- A) Frontalansicht
- B) Seitliche Ansicht (Profil)
- C) Ansicht von hinten (Dorsalansicht)



Bild 11: Frontalansicht

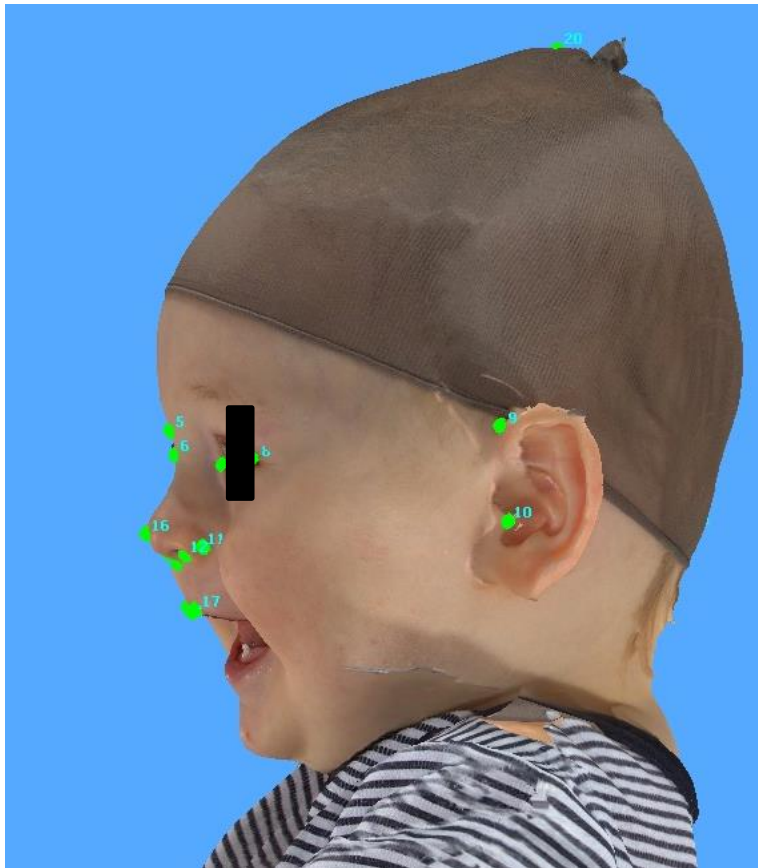


Bild 12: Profilansicht



Bild 13: Ansicht von dorsal

5.4 Berechnung von Distanzen in der dritten Dimension

Die Distanz zwischen zwei unterschiedlichen Messpunkten wurden gemäss der Formel des euklidischen Abstands im dreidimensionalen Raum berechnet: $d = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}$. Diese Formel ergibt die Strecke im dreidimensionalen Raum zwischen zwei Koordinaten, basierend auf der x-, y- und z-Achse (17, 32, 34, 37).

5.5 Variablen

Zu den bekannten möglichen Variablen gehören die von Metzler et al. (43) nachfolgend genannten Punkte: die Präzision, der benutzerspezifische Fehler sowie die Objektpositionierung und die Rekalibration (siehe Tabelle 2).

In Tabelle 2 sind die zur Beurteilung der oben genannten Variablen definierten Nullhypothesen aufgelistet.

Variablen	Nullhypothese und Datenanalyse
Präzision als Vergleich zwischen der digitalen Messung und der direkten anthropometrischen Messung	Die durch herkömmliche Methoden gemessenen Distanzen unterscheiden sich nicht von den virtuell gemessenen.
Fehler entstehen durch die Datenerfassung von mehreren Benutzern bei der Erfassung von sich wiederholenden digitalen Datensets	Die Distanzen, welche durch Person 1 ermittelt werden, unterscheiden sich nicht von den Distanzen, welche durch Person 2 bestimmt werden.
Inadäquate Objektpositionierung und Rekalibration	Sämtliche durch eine Person gemessenen Distanzen unterscheiden sich nicht voneinander.

Tabelle 2: Mögliche Variablen mit den dazugehörigen Nullhypothesen und Datenanalysen gemäss Metzler et al. (43).

5.6 Statistik

Alle Daten wurden mittels deskriptiver Statistik analysiert. Die Reproduzierbarkeit der Daten wurde zusätzlich mittels parametrischem Student's *t*-test analysiert (43). Als Analyseprogramm wurde Excel® für Mac 2011 (Microsoft® Corporation, Redmond, Washington, USA) verwendet.

Als statistisch signifikant wurde ein *p*-Wert bezeichnet, wenn $p < 0.05$ ist.

Berechnung der Distanzen:

Es wurden bei allen Daten die jeweiligen Mittelwerte der *x*-, *y*- und *z*- Koordinaten der einzelnen Landmarken errechnet.

Als Beispiel dient die Messung der Landmarke 19 (s), Crista philtri rechts, bei Patient 1.

$$\left. \begin{aligned} ((x_{\text{Messung 1-1}} + x_{\text{Messung 1-2}} + x_{\text{Messung 1-3}} + \dots)/10) &= \bar{x} \\ ((y_{\text{Messung 1-1}} + y_{\text{Messung 1-2}} + y_{\text{Messung 1-3}} + \dots)/10) &= \bar{y} \\ ((z_{\text{Messung 1-1}} + z_{\text{Messung 1-2}} + z_{\text{Messung 1-3}} + \dots)/10) &= \bar{z} \end{aligned} \right\} \bar{s}_{\text{Patient 1}} = (\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$$

Anschliessend wurden die Beträge der Abweichungen der Messungen zum Mittelwert mit der Formel $d = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}$ errechnet. (Bsp.: Patient 1: ($s_{\text{Patient 1 Diff 1}} = | \bar{s}_{\text{Patient 1}} - s_{\text{Messung 1}} |$ [mm])). Aus den errechneten Differenzen wurde erneut der Mittelwert ermittelt ($\bar{s}_{\text{Patient 1 Diff}}$ [mm]). Der Mittelwert sämtlicher Abweichungen in einem Datenset wurde mit $\bar{\text{Diff}}_{\text{Patient 1}}$ bezeichnet. Weiter wurde die mittlere Abweichung der einzelnen Punkte von sämtlichen Probanden berechnet und als $\bar{a}_{\text{Total Diff}}$, $\bar{b}_{\text{Total Diff}}$, usw. bezeichnet.

6 Resultate

6.1 Die Präzision

Die Präzision einer Messreihe entscheidet, wie gross die Streuung eines Datensatzes an punktuellen Messungen ist. Mit der Richtigkeit definiert sich die Aussagekraft des gemessenen Datensatzes. In Bezug auf den vorliegenden Untersuchungsfall kann die punktuelle Bestimmung der Landmarken innerhalb der fünf Datensätze verglichen werden.

Metzler et al. (43) beschreibt in seiner Arbeit zum Thema Präzision, Benutzerfehler, Objekt-Positionierung und Rekalibration des 3D VECTRA Fotosystem (Canfield, Fairfield, New Jersey, USA), dass innerhalb von zwei Datensätzen ein signifikanter Unterschied ($p = 0.02$) zwischen gemessenen und berechneten Distanzen gefunden wurde. Die mittlere Abweichung lag bei 7.96 mm, bezogen auf die Messungen sämtlicher Daten. Der maximale Wert seiner Daten war 177.97 mm. Die mittlere Diversität von beiden Messungen war 1.33 mm mit einem Maximum von 6.70 mm.

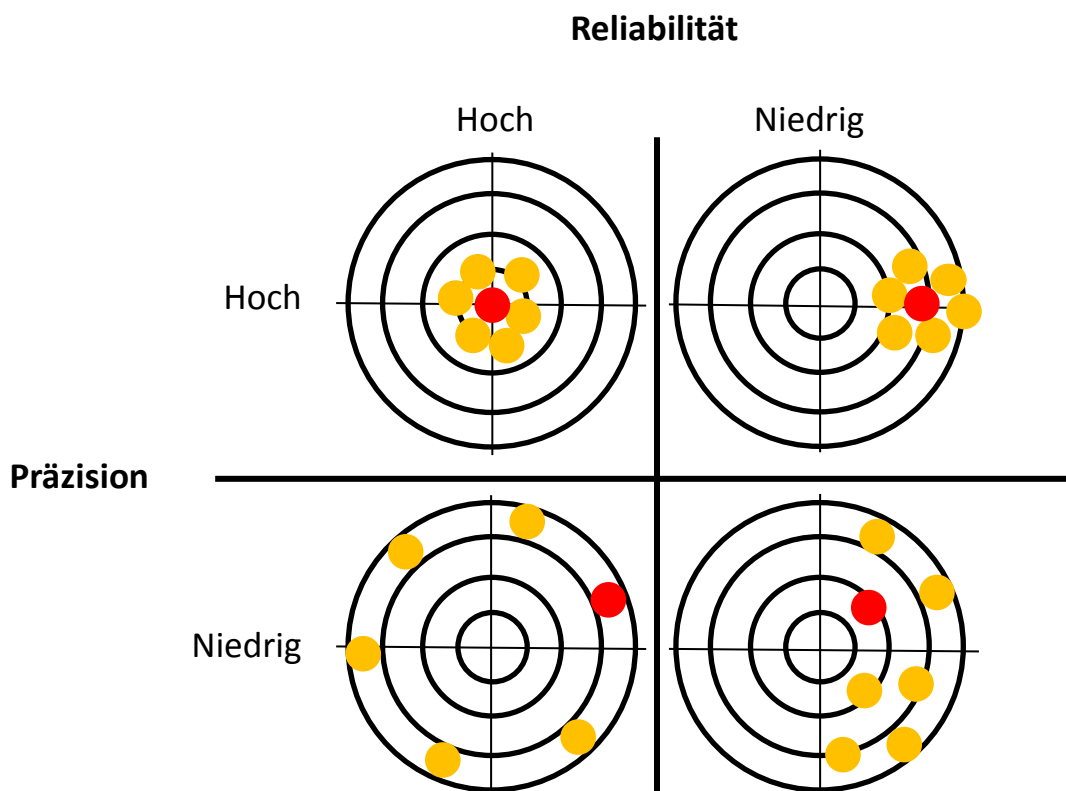


Bild 10: Vergleich Präzision und Richtigkeit

6.2 Benutzerfehler

Der Benutzerfehler wird bei Metzler et al. (43) als das Resultat der auftretenden Ungenauigkeiten, während sich wiederholender Messungen von identischen 3D-Modellen bezeichnet. Die Messungen erfolgten in seiner Arbeit durch unterschiedliche Untersucher. Sämtliche virtuellen Messungen unterschieden sich nicht signifikant ($p = 0.99$). Bei einem Durchschnittswert für die gleiche Distanz in allen 28 virtuellen Modellen war der maximale Unterschied bei allen 1326 gemessenen Distanzen 0.58. (Mittelwert 0.11 mm; Standardabweichung 0.10 mm).

6.3 Objekt-Positionierung und Rekalibration

Eine Rekalibration wurde bei Metzler et al. (43) bei sämtlichen Positionen des verwendeten Modellkopfs durchgeführt. Es wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den virtuell gemessenen Datensets gefunden. Wenn man alle 1326 Distanzen über die 56 Modelle vergleicht, war die maximale Differenz zwischen zwei korrespondierenden Punkten innerhalb des Datenblocks der 74256 Distanzen 9.63 mm. Der Mittelwert der maximalen Differenzen in sämtlichen 1326 korrespondierenden Distanzen war 1.91 ± 0.42 mm.

Fehlende oder unbrauchbare Punkte wurden in einigen Datensets entdeckt, wobei die unbrauchbaren von der Datenanalyse ausgeschlossen wurden.

6.4 Der dynamische Kinderkopf

Bei den Köpfen der pädiatrischen Patienten, den dynamischen Modellen, wurden insgesamt 21 Schädelpunkte vermessen (Bild 7, 8 und 9). Die Position des Schädels war durch die bereits erstellte Aufnahme und der durch das Kind eingenommenen Position vordefiniert. Das Datenset wurde durch mehrere Messungen in Serie erhoben (sog. „intraobserver“). Die Schädelposition konnte nicht spezifisch gewählt werden.

Die Messung direkt am Kinderkopf mittels herkömmlicher Methoden ist oft nur unter erschwerten Bedingungen möglich. Da die Kinder zur optimierten, manuellen Vermessung nicht sediert bzw. anästhesiert werden sollten, um präzise Resultate zu erzielen, wurde auf ein vorgängig manuelles Messverfahren gänzlich verzichtet. Es wurden nur die virtuellen Koordinaten bestimmt und untereinander verglichen.

6.4.1 Abweichungen der Landmarken

Landmarke	Patient 1	Patient 2	Patient 3	Patient 4	Patient 5	Total Diff
1 (\bar{a} Diff)	0.05	0.11	0.04	0.05	0.34	0.12
2 (\bar{b} Diff)	0.07	0.26	0.09	0.13	0.20	0.15
3 (\bar{c} Diff)	0.03	0.15	0.11	0.34	0.10	0.15
4 (\bar{d} Diff)	0.02	0.06	0.11	0.10	0.26	0.11
5 (\bar{e} Diff)	0.26	0.21	0.37	0.40	0.50	0.35
6 (\bar{f} Diff)	0.10	0.16	0.05	0.49	0.50	0.26
7 (\bar{g} Diff)	0.06	0.15	0.17	0.18	0.13	0.14
8 (\bar{h} Diff)	0.35	0.03	0.15	0.28	0.06	0.17
9 (\bar{i} Diff)	0.10	1.09	0.06	0.25	0.23	0.35
10 (\bar{j} Diff)	0.22	1.72	0.22	0.12	0.07	0.47
11 (\bar{k} Diff)	0.54	0.50	0.82	0.34	0.41	0.52
12 (\bar{l} Diff)	0.31	0.06	0.37	0.09	0.04	0.18
13 (\bar{m} Diff)	0.11	0.17	0.25	0.12	0.03	0.14
14 (\bar{n} Diff)	0.10	0.16	0.26	0.07	0.06	0.13
15 (\bar{o} Diff)	0.31	0.13	0.78	0.36	0.25	0.36
16 (\bar{p} Diff)	0.22	0.23	0.05	0.36	0.10	0.19
17 (\bar{q} Diff)	0.16	0.10	0.04	0.16	0.05	0.10
18 (\bar{r} Diff)	0.05	0.10	0.06	0.17	0.05	0.09
19 (\bar{s} Diff)	0.01	0.07	0.10	0.18	0.07	0.08
20 (\bar{t} Diff)	0.33	0.26	0.40	0.36	0.11	0.29
21 (\bar{u} Diff)	1.14	0.60	0.39	0.05	0.21	0.48

Tabelle 3: Abweichungen der Mittelwerte der einzelnen Landmarken in [mm] bei einem gewählten Patientenkollektiv von 5 verschiedenen Personen. Die Total Diff beschreibt den Mittelwert der Differenzen der fünf gemessenen Datenpunkte bei 5 verschiedenen Patienten.

In Tabelle 3 werden die Abweichungen der Mittelwerte als Differenz der gemessenen Koordinaten in Relation zur Mittelwerts-Koordinate dargestellt. Der daraus resultierende Mittelwert (Total Diff) lässt Rückschlüsse über die Abweichungen innerhalb der Datensets (Landmarken/Patienten) zu.

Die in der Tabelle 3 bestimmten Differenzen weisen ein Maximum bei Landmarke 11 (\bar{k}_{Diff}) mit einer Grösse von 0.52 mm und ein Minimum bei Landmarke 19 (\bar{s}_{Diff}) mit einer Grösse von 0.08 mm auf.

6.4.2 Landmarke 11, Alare links

Die grösste Abweichung der Messungen ist in der vorliegenden Studie bei Landmarke 11, Alare links, erkennbar. Die Mittlere Abweichung der Landmarke 11 (k), (\bar{k}_{Diff}), findet sich im Bereich zwischen 0.33 mm ($\bar{k}_{\text{Patient 4 Diff}}$) bei Patient 4 und 0.82 mm ($\bar{k}_{\text{Patient 3 Diff}}$) bei Patient 3. Die durchschnittliche Differenz ($\bar{k}_{\text{Total Diff}}$) liegt bei 0.52 mm.

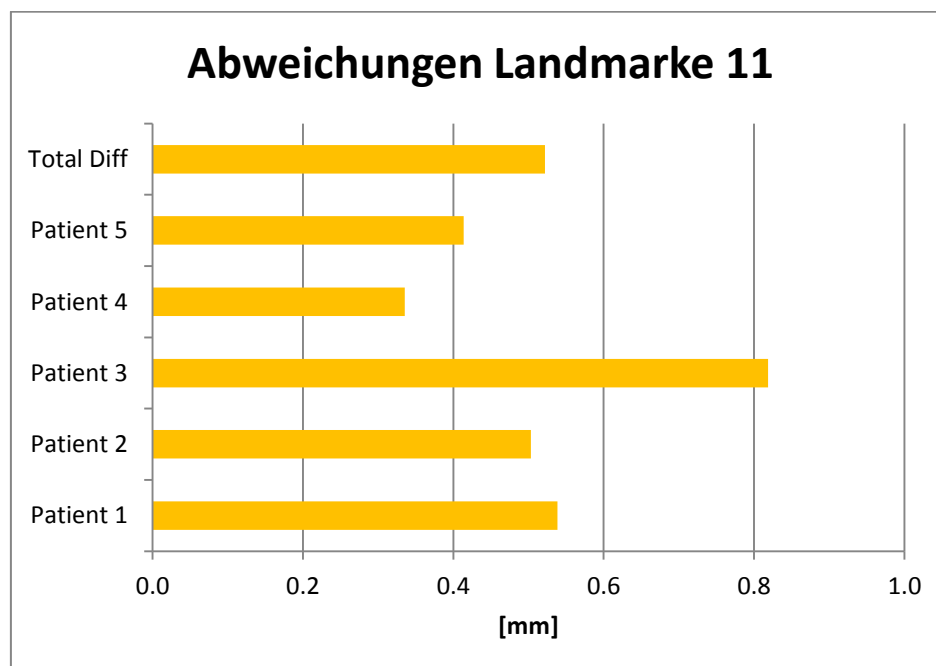


Diagramm 1: Landmarke 11 (k), (\bar{k}_{Diff}), Alare links, Abweichungen in Bezug zum Patientenkollektiv

6.4.3 Landmarke 19, Crista philtri rechts

Landmarke 19 (s), Crista philtri rechts, weist in der aktuellen Studie die genauesten Ergebnisse auf. Die Mittlere Abweichung der Landmarke 19 (s), (\bar{s}_{Diff}), findet sich im Bereich zwischen 0.01 mm ($= \bar{s}_{\text{Patient 1 Diff}}$) bei Patient 1 und 0.18 mm ($= \bar{s}_{\text{Patient 4 Diff}}$) bei Patient 4. Die durchschnittliche Differenz ($\bar{s}_{\text{Total Diff}}$) liegt bei 0.08 mm.

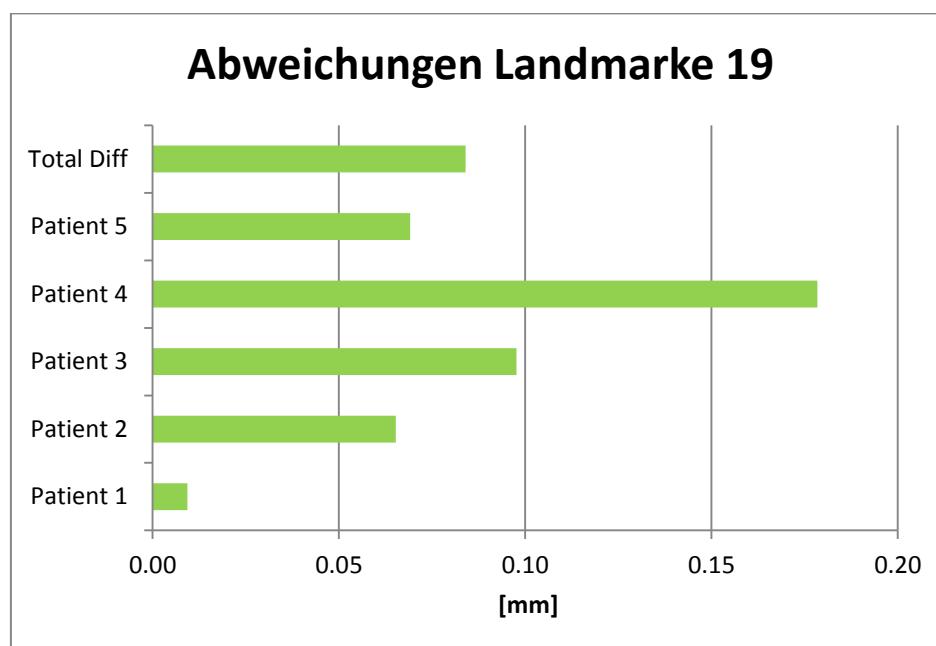


Diagramm 2: Landmarke 19 (s), (\bar{s}_{Diff}), Crista philtri rechts, Abweichungen in Bezug zum Patientenkollektiv

6.4.4 Gesamtabweichung

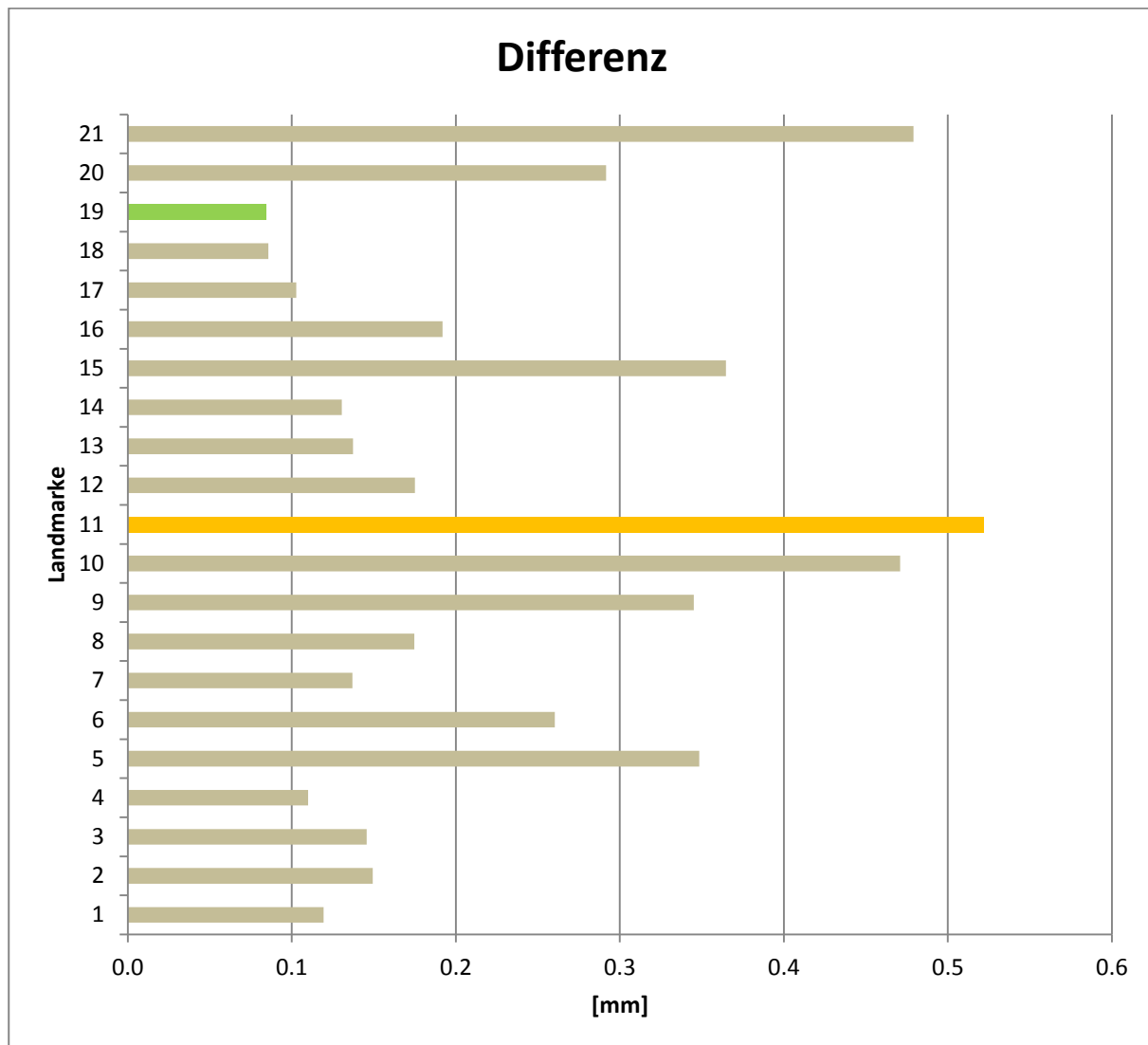


Diagramm 3: Auflistung der Differenzen [mm] in Bezug zu den gesetzten Landmarken

Innerhalb der gesamten Datensets und bezogen auf alle gemessenen Landmarken ist eine Abweichung zwischen $(\text{Total Diff})_{\min}$ 0.01 mm, bei Landmarke 19, Crista philtri rechts, und $(\text{Total Diff})_{\max}$ von 0.82 mm, bei Landmarke 11, Alare links, mit einer Gesamtdifferenz $(\text{Total Diff})_{\max-\min}$ von 0.48 mm erkennbar. Die mittlere Abweichung innerhalb der 21 Landmarken beträgt 0.23 mm.

Die totale Differenz (Total Diff) kann in dieser Studie in 6 Gruppen eingeteilt werden (siehe Tabelle 4).

Total Diff	Bereich in mm
(Differenz) ₁	= 0.0 mm < (Total Diff) < 0.1 mm
(Differenz) ₂	= 0.1 mm < (Total Diff) < 0.2 mm
(Differenz) ₃	= 0.2 mm < (Total Diff) < 0.3 mm
(Differenz) ₄	= 0.3 mm < (Total Diff) < 0.4 mm
(Differenz) ₅	= 0.4 mm < (Total Diff) < 0.5 mm
(Differenz) ₆	= 0.5 mm < (Total Diff)

Tabelle 4: Grössenzuordnung der totalen Differenzen in definierte Bereiche

Die Zugehörigkeit der Landmarken bezogen auf die unterschiedlichen Gruppierungen der totalen Differenzen ist in Tabelle 5 beschrieben:

Total Diff	Landmarke 1-21	Stück	Prozentualer Anteil [%]
(Differenz) ₁	Landmarke 18 (r) Landmarke 19 (s)	2	9.52
(Differenz) ₂	Landmarke 1 (a) Landmarke 2 (b) Landmarke 3 (c) Landmarke 4 (d) Landmarke 7 (g) Landmarke 8 (h) Landmarke 12 (l) Landmarke 13 (m) Landmarke 14 (n) Landmarke 16 (p) Landmarke 17 (q)	11	52.38
(Differenz) ₃	Landmarke 6 (f) Landmarke 20 (t)	2	9.52
(Differenz) ₄	Landmarke 5 (e) Landmarke 9 (i) Landmarke 15 (o)	3	14.28
(Differenz) ₅	Landmarke 10 (j) Landmarke 21 (u)	2	9.52
(Differenz) ₆	Landmarke 11(k)	1	4.76

Tabelle 5: Vergleich der Landmarken bezogen auf die Grösse der Abweichungen (Total Diff)

Betrachtet man die Resultate von Tabelle 5, lässt sich erkennen, dass sämtliche Resultate (100%) < 1 mm sind. Innerhalb des Bereichs von 0 - 1 mm lässt sich ein Maximum von 52.38% der Resultate in einem Bereich um $0.1 \text{ mm} < (\text{Total Diff}) < 0.2 \text{ mm}$ erkennen.



Diagramm 4: Prozentuale Verteilung der Landmarken innerhalb der sechs Gruppen

6.4.5 Ergebnisse der einzelnen Patienten

Bei den folgenden Diagrammen wurden die einzelnen Patientendaten analysiert und das Augenmerk auf die Streuung der Abweichungen [mm] in Bezug zu den Landmarken der einzelnen Patienten gerichtet.

6.4.6 Ergebnisse Patient 1

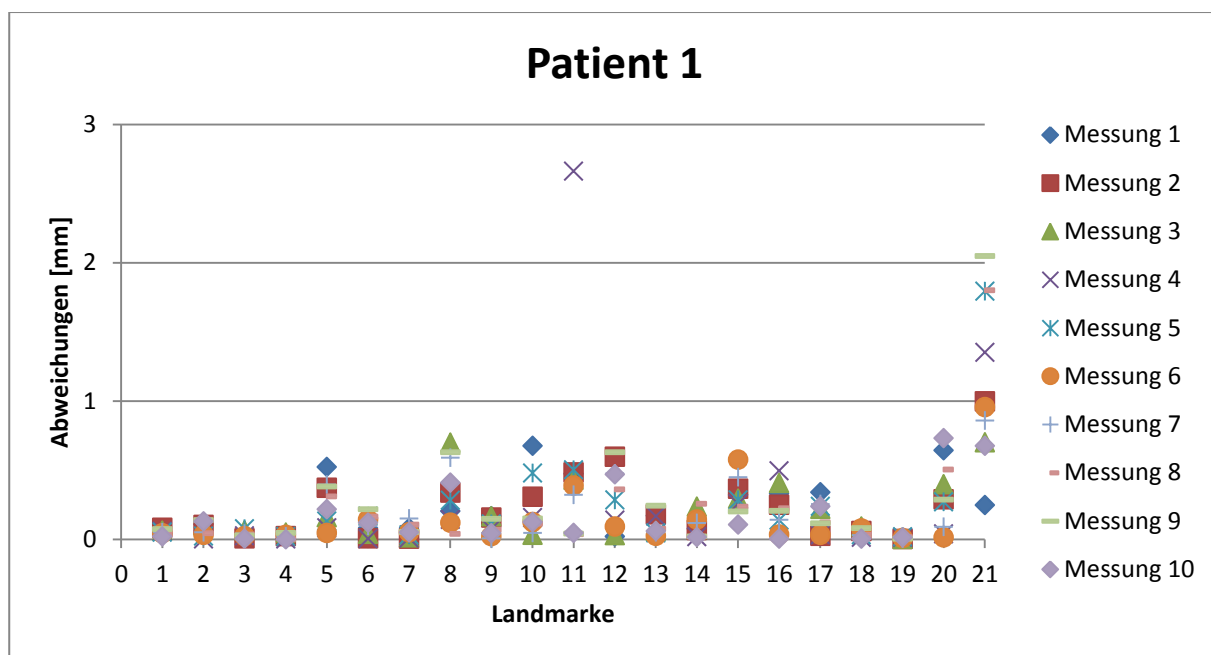


Diagramm 5: Abweichungen der Messungen unterschiedlicher Landmarken bei Patient 1

In Diagramm 5 sind die grössten Abweichungen (Abweichung > 1mm) der Messungen zum Mittelwert bei Landmarke 11 und Landmarke 21 zu erkennen. Die grösste Abweichung findet sich bei Landmarke 11 in Form von Messung 4, welche eine Grösse von 2.66 mm aufweist. Danach findet sich die zweitgrösste Abweichung bei Landmarke 21 mit 2.05 mm.

6.4.7 Ergebnisse Patient 2

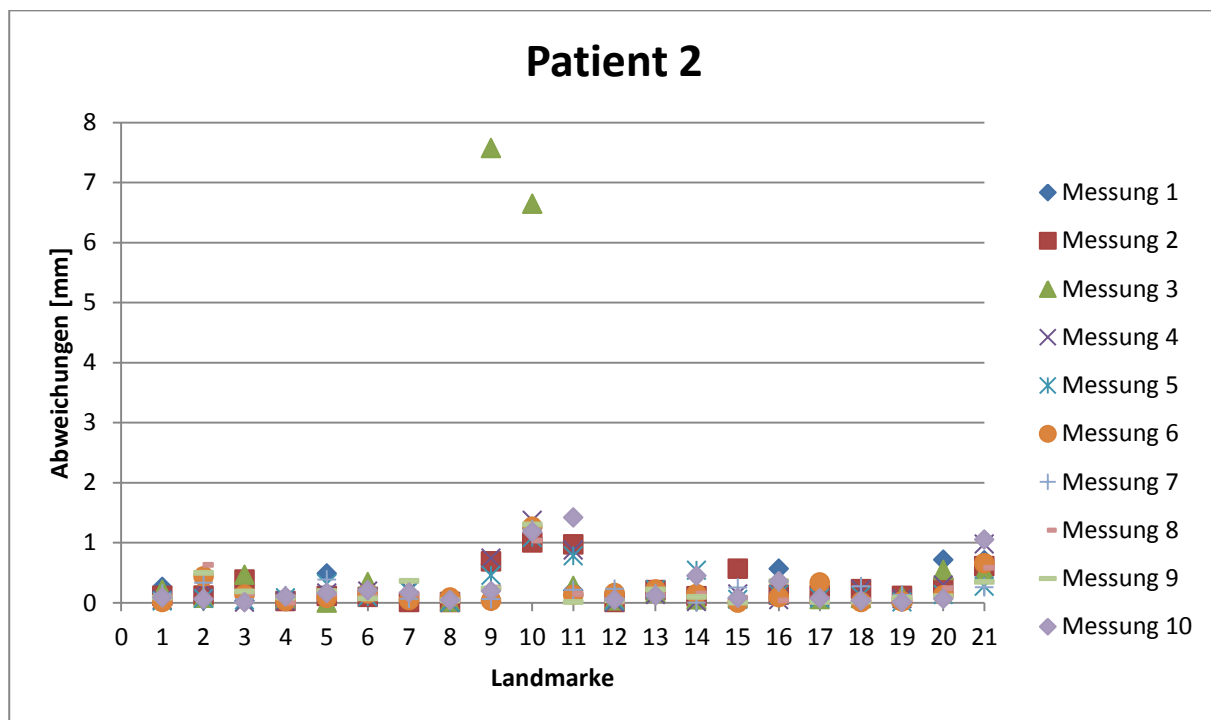


Diagramm 6: Abweichungen der Messungen unterschiedlicher Landmarken bei Patient 2

Bei Patient 2 fallen die Messungen der Landmarken 9 und 10 auf, welche als einzige bei der 3. Messung eine Abweichung grösser als 6 mm aufweisen. Werden die beiden Messungen als Ausreisser angenommen, sieht man im Diagramm 6 die grössten Abweichungen (Abweichung > 1 mm) der Messungen zum Mittelwert bei Landmarke 10, 11 und bei Landmarke 21. Die grösste Abweichung findet sich bei Landmarke 11 in Form von Messung 10, welche eine Grösse von 1.42 mm aufweist. Danach findet sich die zweitgrösste Abweichung bei Landmarke 9 mit 1.37 mm und Landmarke 21 mit 1.05 mm.

6.4.8 Ergebnisse Patient 3

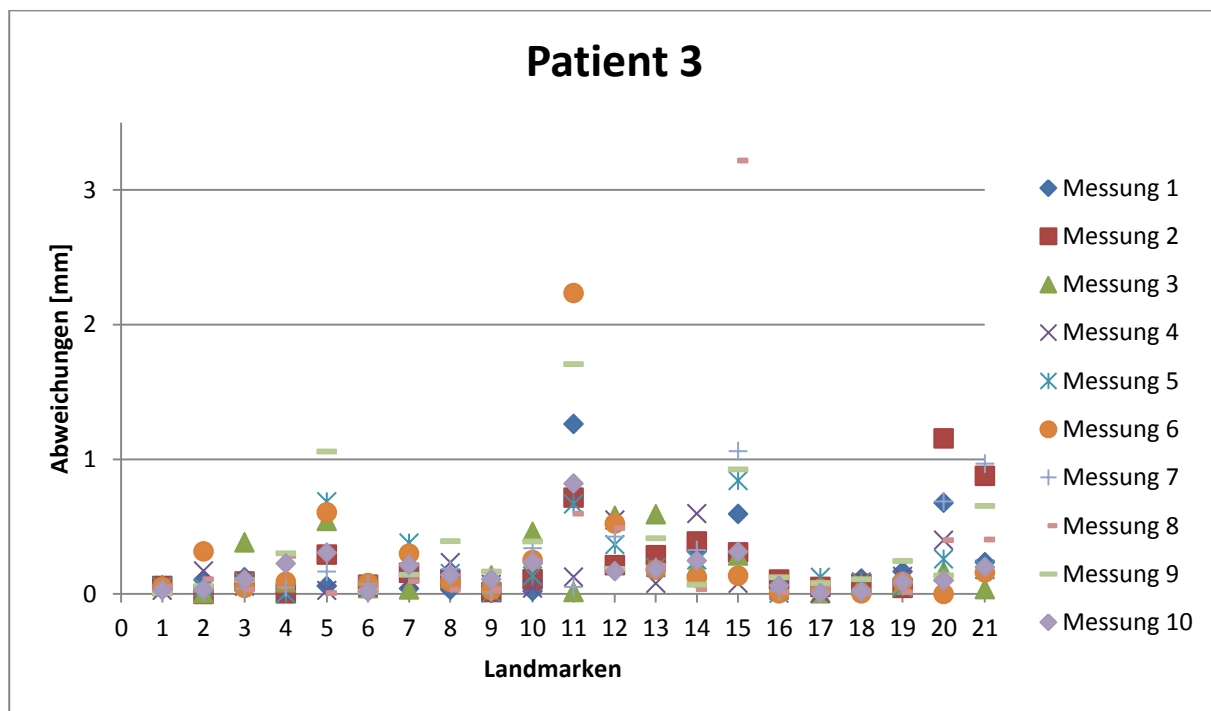


Diagramm 7: Abweichungen der Messungen unterschiedlicher Landmarken bei Patient 3

Im Diagramm 7 finden sich die grössten Abweichungen (Abweichung > 1mm) der Messungen zum Mittelwert bei Landmarke 5, 11, 15 und bei Landmarke 20. Die grösste Abweichung findet sich bei Landmarke 15 in Form von Messung 8, die eine Grösse von 3.22 mm aufweist. Danach findet sich die zweitgrösste Abweichung bei Landmarke 11 mit 2.23 mm, Landmarke 20 mit 1.15 mm und Landmarke 5 mit 1.06 mm bei Messung 9.

6.4.9 Ergebnisse Patient 4

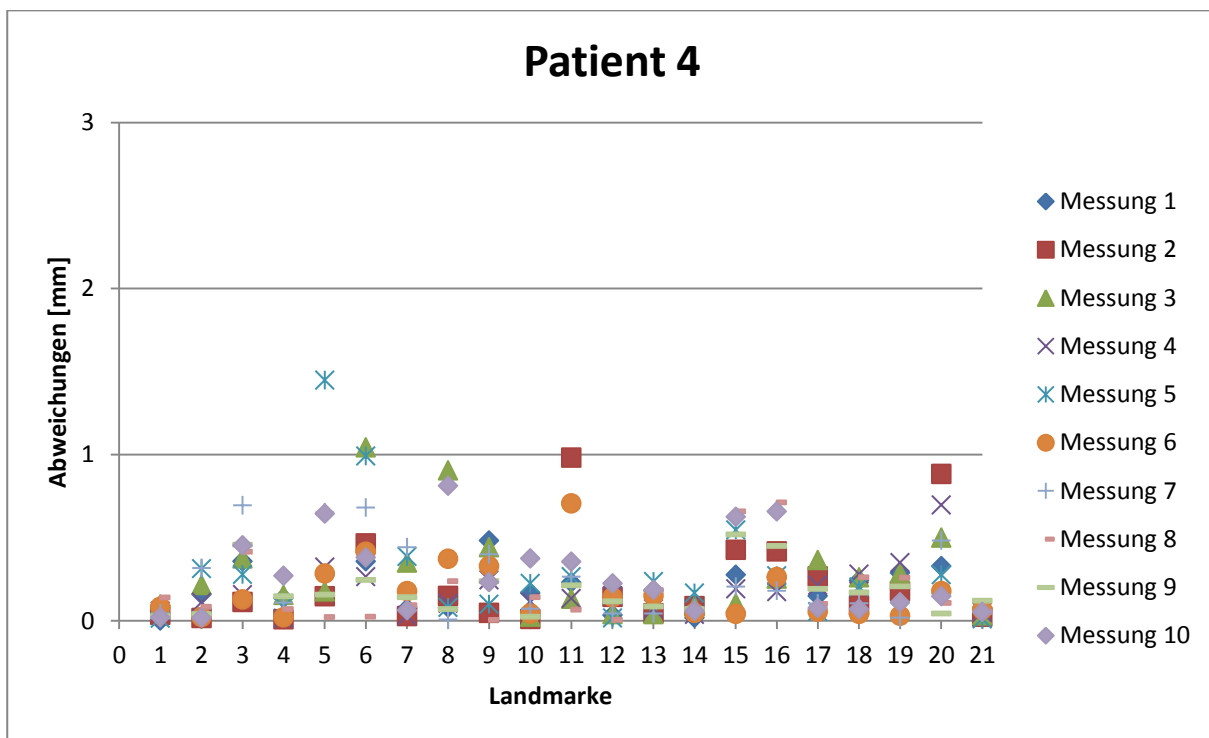


Diagramm 8: Abweichungen der Messungen unterschiedlicher Landmarken bei Patient 4

Im Diagramm 8 sind die grössten Abweichungen (Abweichung > 1mm) der Messungen zum Mittelwert bei Landmarke 5 und 6 zu erkennen. Die grösste Abweichung findet sich bei Landmarke 5 in Form von Messung 5, welche eine Grösse von 1.45 mm aufweist. Danach findet sich die zweitgrösste Abweichung bei Landmarke 6 mit 1.04 mm bei Messung 3.

6.4.10 Ergebnisse Patient 5

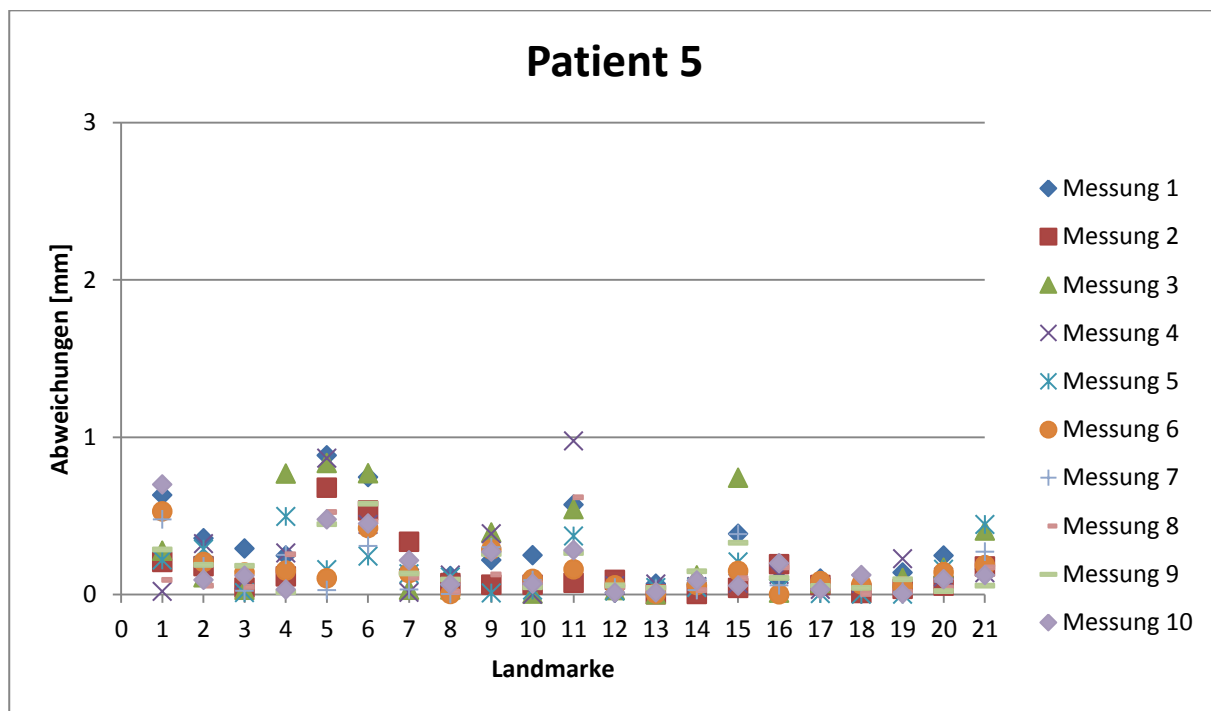


Diagramm 9: Abweichungen der Messungen unterschiedlicher Landmarken bei Patient 5

Im Diagramm 9 finden sich keine Abweichungen $> 1\text{mm}$. Die grössten Abweichungen der Messungen zum Mittelwert finden sich bei Landmarke 5 und 11. Die grösste Abweichung findet sich bei Landmarke 11 in Form von Messung 4, welche eine Grösse von 0.98 mm aufweist. Danach findet sich die zweitgrösste Abweichung bei Landmarke 5 mit 0.88 mm , bei Messung 1.

7 Diskussion

Die Möglichkeiten von 3D-Oberflächenmessungen durch Methoden wie zum Beispiel dem Laserscanner (5, 26), der 3D-Fotogrammetrie (33, 45, 49) oder strukturiertem Licht (35, 50) nehmen in der Medizin der Zukunft kontinuierlich zu. Durch die unterschiedlichen Möglichkeiten sind diese Anwendungen in verschiedensten Fachdisziplinen der Medizin einzusetzen und auf Grund der strahlenfreien Aufnahmetechnik wird der 3D-Oberflächenmessung immer mehr Beachtung geschenkt. Die Aufnahmen, welche in Bruchteilen von Sekunden erfolgen, und die Möglichkeit, ganze Datensets digital zu erfassen, sind weitere Vorteile dieser Techniken.

7.1 Bilderfassung

Die Bilderfassung wird in Form von fünf auf das zu messende Objekt gerichteten Kameras erstellt. Die Aufnahme eines Bildes erfolgt in der Regel im Bruchteil weniger Millisekunden. Diese kurze Aufnahmezeit schliesst Bewegungen der Probanden fast gänzlich aus und optimiert damit die Bildqualität massgeblich. So werden auch Aufnahmen von Patienten ermöglicht, welche nicht auf Befehl „stillhalten“ können. In der Regel handelt es sich dabei um sehr junge Patienten, vorwiegend Säuglinge und Kleinkinder.

Da die Bilderfassung auf Grund ihrer Geschwindigkeit selten unscharfe Bilder liefert, muss der Fehler von fehlerhaften Bildpunkten (z.B. verschwommene Bilder, Doppelbilder) innerhalb der Software selber zu suchen sein. Diese setzt die Aufnahmen der fünf Kameras zu einer einzigen dreidimensionalen Oberfläche zusammen. Dieser 3D-Nachkonstruktionsprozess kann nur dann korrekt stattfinden, wenn sämtliche der von den fünf Kameras aufgenommenen Regionen sich innerhalb des Sichtfeldes der Kameras befinden. Andernfalls kann es zu einem Datenverlust durch Nichtaufnahme der betroffenen Region kommen. Es empfiehlt sich daher, die Datensätze genau auf mögliche Fehler zu kontrollieren und im Vorfeld mehrere Datensätze des gleichen Probanden anzulegen. Nach Kontrolle der Daten sollte jeweils der geeignetste Datensatz für Folgeanalysen und Datenauswertung verwendet werden. Das zentrierte Platzieren des aufzunehmenden Modells ist diesbezüglich von Vorteil.

Die Möglichkeit, mehrere Aufnahmen ohne grossen Aufwand zu erstellen, ist als positiver Punkt zu werten, der für das 5-pod Vectra 3D-System (Canfield, Fairfield, New Jersey, USA) spricht. Die Aufnahmen erfolgen innerhalb kürzester Zeit und weisen keine Strahlenbelastung auf.

7.2 Das 5-pod Vectra 3D-System

Eine Vielzahl von Studien wurden bereits über 3D-photogrammetrische Systeme erstellt. In diesen wurde vielfach die Präzision und Genauigkeit evaluiert, welche einen wesentlichen Aspekt darstellen, um die Geräte anschliessend klinisch nutzen zu können. Die Präzision und Genauigkeit des 5-pod Vectra 3D-System (Canfield, Fairfield, New Jersey, USA) wurde, soweit bekannt, erstmals von Metzler et al. (43) beschrieben. Wohl eines der wichtigsten Merkmale des Vectra 3D-Systems ist die Möglichkeit der 360° Oberflächenaufnahme des kraniofazialen Bereichs mit nur einer Messung.

7.3 Diskussion

In dieser Arbeit wurde die dreidimensionale Reproduzierbarkeit anthropometrischer, kraniofazialer Landmarken am dynamischen Modell untersucht. Zu diesem Zweck wurden Aufnahmen von Patienten der Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie des Universitätsspitals Zürich ausgewertet, welche zuvor mit einem 5-pod Vectra 3D-System (Canfield, Fairfield, New Jersey, USA) aufgenommen wurden.

In einem dynamischen Versuch wurden fünf Patienten des Universitätsspitals Zürich (USZ), welche zufällig aus der Datenbank des Instituts für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie ausgewählt wurden, vermessen.

Durch die Verwendung eines Modellkopfs mit definierten, im Vorfeld markierten, Landmarken (statisch) wurde durch Metzler et al. (43) das verwendete 5-Pod Fotosystem im Vergleich zur manuellen Vermessung verglichen und ein deutlicher Vorteil der digitalen Messung gezeigt. Die Vermessung von Kinderköpfen mit anatomisch definierten Landmarken (dynamisch) ermöglicht, Fehlerquellen und Probleme des 5-Pod Fotosystems bei sich bewegenden Modellen zu erkennen.

Das 5-Pod System hat den Vorteil, eine 360° Oberflächenaufnahme zu erstellen. Weiter ist das System einfach zu kalibrieren und auch die Handhabung der Software ist sehr benutzerfreundlich gestaltet.

Da das Setzen der Landmarken in dieser Studie nur durch einen Benutzer erfolgte, ist entsprechend das Resultat der auftretenden Ungenauigkeiten, bei sich wiederholenden Messungen, nur innerhalb dieses einzigen Benutzers zu finden. Wir sprechen hier von der im englischen Sprachgebrauch gebräuchlichen „intra-rater reliability“. Ein Vergleich mit anderen Benutzern, die sog. „inter-rater reliability“, wurde nicht evaluiert. Für weitere Studien wäre es von Vorteil, die Vermessung der Kinder durch verschiedene Benutzer vorzunehmen, um die Unterschiede zu erkennen und in den klinischen Alltag zu implementieren.

Ein Benutzerfehler besteht im inkorrekten Setzen der Landmarken. Dieser Fehler ist massgeblich in der erhöhten Differenz (Total Diff) der Datensets zu suchen und äussert sich bei ähnlichen Landmarken, vergleicht man die Datensets der fünf Köpfe.

In dieser Studie finden sich die drei grössten Abweichungen bei den folgenden Landmarken: Landmarke 11 (Alare links) > Landmarke 21 (Opisthocranium) > Landmarke 10 (Tragion links). Bei all diesen Landmarken liegen die Abweichungen über einem Wert von 0.47 mm. Ein Vergleich innerhalb der Landmarken lässt erkennen, dass die Landmarke 11 (Alare links) mit einer Differenz von 0.52 mm die grösste Abweichung aufweist. Im Vergleich zu den anderen Landmarken liegt Landmarke 11 (Alare links) mit 4.76% als einzige über 0.5 mm Differenz. Mit einer Abweichung zwischen 0.4 mm und 0.5 mm finden sich die Landmarke 21 (Opisthocranium) und die Landmarke 10 (Tragion links) mit 9.52%. Die (Total Diff)₅₊₆ der Landmarken über 0.4 mm

beträgt somit 14.26%. Das entspricht knapp 15% von gesamten 100%, wenn man alle Landmarken betrachtet.

Vergleicht man innerhalb der Landmarke 11 (Alare links), der Landmarke mit den grössten Abweichungen, die unterschiedlichen Patientendaten, ist festzustellen, dass Patient 3 die grösste und Patient 4 die kleinste Abweichung der Messungen aufweist. Die Mittlere Abweichung der Landmarke 11 (\bar{k}), (\bar{k}_{Diff}), findet sich im Bereich zwischen 0.34 mm ($\bar{k}_{\text{Patient 4 Diff}}$) und 0.82 mm ($\bar{k}_{\text{Patient 3 Diff}}$). Die durchschnittliche Differenz ($\bar{k}_{\text{Total Diff}}$) liegt bei 0.52 mm.

Innerhalb der Landmarke 19 (Crista philtri rechts), ist festzustellen, dass Patient 4 die grösste, Patient 1 die kleinste Abweichung der Messungen aufweist. Die Mittlere Abweichung der Landmarke 19 (\bar{s}), (\bar{s}_{Diff}), findet sich im Bereich zwischen 0.01 mm ($= \bar{s}_{\text{Patient 1 Diff}}$) und 0.18 mm ($= \bar{s}_{\text{Patient 4 Diff}}$). Die durchschnittliche Differenz ($\bar{s}_{\text{Total Diff}}$) liegt bei 0.08 mm.

Am häufigsten finden sich Landmarken mit einer totalen Abweichung (Total Diff)₂ von 0.1 mm bis 0.2 mm. 52.38% der gesetzten Landmarken gehören in diesen Bereich. Das entspricht knapp mehr als der Hälfte. Mit 9.52% Anteil finden sich die Punkte mit der kleinsten Abweichung, welche zu den Landmarken 18 (Labiale superius) und 19 (Crista philtri rechts) gehören. Sie weisen eine (Total Diff)₁ auf, die kleiner 0.1 mm ist. Insgesamt kann man erkennen, dass sämtliche gemessenen Landmarken im Bereich der (Total Diff) < 1 mm gesetzt wurden. Das lässt auf eine sehr gute Wiederholbarkeit innerhalb dieses einzigen Benutzers schliessen. Auch die Präzision ist sehr gut. Sie widerspiegelt sich in der grössten Gruppe (Total Diff)₂ mit 52.38%.

Betrachtet man die einzelnen Patientendaten, erkennt man, dass jeweils Landmarke 11 (Alare links), die grössten Abweichungen innerhalb der Messungen aufweist. Einige Ausreisser sind vorhanden, können aber statistisch eruiert werden. Bestes Beispiel sind die zwei Ausreisser bei Landmarke 9 (Otabasion superius links) und Landmarke 10 (Tragion links) in Diagramm 6 von Patient 2. Die beiden Messungen verfügen über einen Wert von mehr als 6 mm Gesamtabweichung und sind daher, in Übereinstimmung mit der Genauigkeit der anderen Landmarken, als „Ausreisser“ zu bezeichnen.

Vergleicht man die Landmarken mit hohen Differenzen mit denjenigen, welche entsprechend tiefe Werte aufweisen, lässt sich bei den optischen 3D-Bildern ein Muster erkennen. Bei Landmarken mit hohen Abweichungen ist der gesetzte Bildpunkt der Landmarke schlecht identifizierbar. Eine Landmarke setzt sich für den Benutzer leichter bei einer scharfen Kontur, einer Struktur mit hohen Kontrastunterschieden oder klar abgrenzbaren Linien. Im Gegensatz dazu sind Strukturen, welche unscharf oder schlecht erkennbar sind, massgeblich für hohe Abweichungen verantwortlich.

Massgeblich für die Abweichung bei den Alare ist die Schwierigkeit der Bestimmung dieses Punktes. Die Landmarke „Alare“ tritt bilateral der Nasenflügel auf und bezeichnet jeweils den Maximalpunkt der lateralsten Stelle, bezogen auf die konvexe Form der Ala. Genau diese Kon-

vexität erschwert es, die Landmarke präzise und reproduzierbar zu setzen. Auf www.facebase.org wird beschrieben, dass der Punkt vorgängig am Patienten eruiert und markiert werden sollte. Dies geschieht in der anterior-posterioren Richtung durch subnasale Betrachtung und in der superior-inferioren Richtung durch Frontalansicht.⁴ Diese Art der Bestimmung ist auch am Computerbildschirm in 3D-Ansicht möglich, erschwert jedoch den gesamten Prozess der Landmarkensetzung und braucht mehr Zeit.

Vergleicht man die Landmarke mit der grössten Abweichung, 11 (Alare links), mit dem entsprechenden Punkt auf der gegenüberliegenden Gesichtshälfte, 15 (Alare rechts) und zieht man einen Vergleich zu früheren Studien (6, 42), dann lässt sich Folgendes erkennen: Beide Landmarken sind gleich schwierig zu setzen, da sie den selben Punkt beschreiben. Dennoch kann es vorkommen, dass die eine Landmarke auf Grund besserer Begebenheiten (Kontrast, Bildschärfe, höhere Aufnahmequalität, Ausleuchtung) präziser gesetzt werden kann. In vergleichbaren Studien beschreibt Ort et al. (41) eine totale Differenz von 0.64 mm (Untersucher 1) resp. 1.19 mm (Untersucher 2) bei Alare links und 0.87 mm (Untersucher 1) resp. 1.43 mm (Untersucher 2) bei Alare rechts. Währenddessen bei Brügger et al. (6) die totale Differenz bei Alare links bei 1.19 mm und Alare rechts bei 1.43 mm liegt. In beiden Studien wurde das 3dMDface System der Firma 3dMD Inc. (3dMD Inc., Atlanta, Georgia, USA) verwendet und in beiden Studien war Alare nicht der Punkt mit der grössten Abweichung. Diese wurde jeweils bei der Landmarke des Softgonion gefunden. Alare findet man in den vorliegenden Studien im Bereich von $1\text{ mm} < x < 1.5\text{ mm}$. Im Vergleich dazu liegt die Abweichung dieser Arbeit mit einer Grösse von 0.52 mm bei Alare links und 0.36 mm bei Alare rechts, trotz grösster gemessener Differenz bei Landmarke 11 (Alare links), deutlich unter den genannten Werten von Brügger et al. (6) und Ort et al. (41), was für die Genauigkeit des Messsystems und die gute Reproduzierbarkeit der Messungen spricht.

Eine weitere Schwierigkeit, in Bezug auf das Setzen der Landmarken, ist am Beispiel der Landmarke 21 (Opisthocranium) feststellbar. Landmarke 21 (Opisthocranium) markiert den Hinterkopf, eine Struktur, welche von Haaren bedeckt ist. Um die nötigen Schädelkonturen dennoch möglichst präzise wiederzugeben, wird den Patienten eine Haube in Form eines Strumpfes angelegt. Dieser soll die Haare möglichst nahe an die Kopfhaut drücken, um eine präzise Messung zu ermöglichen. Es ist davon auszugehen, dass bei dieser Methode die Koordinaten der Landmarken schwierig zu detektieren sind. Je grösser das zu kaschierende Haarvolumen ist, desto schwieriger ist es, eine gute Messung zu erstellen und desto grösser werden die Abweichungen der Resultate. Die zu bestimmende Position der Landmarke 21 (Opisthocranium) wird beeinflusst durch die Strukturen, welche sie bedecken; in diesem Fall das Deckhaar und der darüber liegende Strumpf. Grenzen sind dabei nicht erkennbar. Die Landmarke muss durch Drehen und Zoomen des Kopfes im dreidimensionalen Raum avisiert und bestimmt werden. Viel einfacher ist es, eine Landmarke bei dem inneren Augenlid zu setzen. Dieser Punkt ist scharf begrenzt, gut erkennbar und seine Bestimmung erfolgt zuverlässig. Klar definierte wie auch anatomisch

⁴ https://www.facebase.org/facial_norms/notes/6262 zuletzt besucht am 30.05.2014

vorgegebene, reproduzierbare Landmarken ermöglichen Messungen mit einer höheren Präzision und Wiederholbarkeit.

Die Eignung des Systems in puncto Zuverlässigkeit und Korrektheit wird in Bezug auf die Analyse von anthropometrischen Daten durch die statistische Möglichkeit der Identifikation innerhalb von retrospektiven Studien noch verbessert. Nachträgliche, virtuelle Datenkorrekturen können ohne Probleme durchgeführt werden. Nachmessungen sind schnell und einfach möglich. Das System zeigt eine hohe Präzision und Genauigkeit, wenn es um die Bestimmung von Landmarken geht. Gemessene Fehler waren immer klein ($< 1\text{ mm}$) und daher klinisch nicht relevant. Die Reproduzierbarkeit der Daten ist sehr gut. Das System arbeitet sehr zuverlässig und die Resultate haben eine hohe Übereinstimmung. Aus diesen Gründen können die Nullhypothesen 2 und 3 bestätigt werden (43).

Probleme, die sich bei den Messungen ergeben, wurden teilweise schon in früheren Studien erkannt, welche unter anderem von Vorgängermodellen des 5-Pod Fotosystems handeln wie z.B. dem 2-Pod Fotosystem (3dMD Inc., Atlanta, Georgia) (6, 41). Bei den Vorgängermodellen handelt es sich aber um Produkte, welche keinen direkten Vergleich mit dem 5-Pod Fotosystem zulassen.

Artefakte können durch Bewegungen entstehen, genauso kann es beim Weinen zu Verzerrungen aufgrund der Oberflächenreflexion kommen. Die Schwierigkeit transparente, schattige oder glänzende Oberflächen darzustellen, ist auch bei diesem Fotosystem ein Thema, das beachtet werden muss. So hat Brügger et al. (6) schon bei früheren Systemen auf diese Fehler aufmerksam gemacht. Weiter ist, bezogen auf Patienten mit kraniofazialen Missbildungen wie zum Beispiel Lippen-Kiefer-Gaumenspalten, bekannt, dass solche Oberflächenanomalien die Schwierigkeit des Setzens von Landmarken erhöhen kann.

Nebst all den Abweichungen, die durch verschiedensten Faktoren entstehen können, ist das Ziel einer Totalen Differenz von 0.0 mm eher unwahrscheinlich. Obschon die Messungen immer präziser werden und die Reproduzierbarkeit sich durch genauere Aufnahmetechniken und Software verbessert, bleiben genügend Variablen (Untersucher, Oberflächentextur, Deckhaar, kraniofaziale Missbildungen, Tränen, Bewegungen), sodass ein gewisses Mass an Abweichung auftritt. Abweichungen, welche sich im Bereich der Totalen Differenz von $\leq 0.5\text{ mm}$ abspielen, sind in ihrer Grösse klinisch vernachlässigbar (1, 33). Nur Abweichungen, die grösser als 1 mm sind, müssen zwingend berücksichtigt werden, da sie von klinischer Relevanz sind (1, 32-34).

7.4 Schlussfolgerung

Beim 5-pod Vectra 3D-Fotosystem (Canfield, Fairfield, New Jersey, USA) handelt es sich um das erste 360° 5-pod System dieser Art, welches bisher untersucht wurde.

Ein grosser Vorteil des 5-Pod Fotosystems ist die Geschwindigkeit des Messverfahrens. Sie erlaubt so ebenfalls bei Patienten mit schlechter Compliance entsprechend gute Resultate zu erzielen. Die schwierige, direkte Ausmessung am Patienten entfällt.

Erkennbar ist auch, dass die Qualität der Strukturen, der Kontrast und die damit verbundene Schärfe des Bildes entscheidend sind, um später die Landmarken korrekt zu setzen. Mit genau abgegrenzten Strukturen, welche ein exakteres Setzen von digitalen Landmarken ermöglichen, lassen sich genauere Resultate erzielen.

Das 5-Pod Fotosystem zeigt gemäss dem aktuellen Versuch eine hohe Präzision und Genauigkeit, wenn es um die Bestimmung von Landmarken geht. Gemessene Fehler waren klein (< 1 mm) und als klinisch nicht relevant angesehen. Die Reproduzierbarkeit der Daten ist sehr gut, das System arbeitet sehr zuverlässig und die Resultate zeigten eine hohe Übereinstimmung (43). Das System ist auf Grund seiner Genauigkeit und der hohen Reproduzierbarkeit für die Messung anthropometrischer Daten geeignet.

7.5 Ausblick

Es ist davon auszugehen, dass in Zukunft die Technik der 3D-Fotosysteme noch ausgereifter sein wird und zunehmende Anwendungsbereiche findet. Aufnahmequalität und Benutzerfreundlichkeit werden verbessert sowie die Handhabung weiter vereinfacht werden. Für die Messung an lebenden Probanden gilt es, in Zukunft ungewollte Bewegungen zu vermeiden und die Problematik des störenden Haarvolumens zu reduzieren. Insgesamt braucht es eine Verbesserung der störenden, reflektierenden Oberflächen.

Eine zunehmende Anwendung des 3D-Systems ermöglicht eine grössere Anzahl von Studien, einen konsekutiven Wissenszuwachs, welcher zur weiteren Verbesserung und Entwicklung in diesem Bereich führen wird.

Eine weitere Möglichkeit in der Anwendung wird die Verwendung der vierten Dimension bieten: Die als 4D-Aufnahmen bezeichneten Messungen weisen nebst der räumlichen Dimension auch noch den Faktor Zeit (t) auf, welche die Vermessung von Körperteilen in Bewegung und damit über eine gewisse Zeitspanne aufzeichnet. Die auf dieser Technik basierenden Messsysteme lassen auf ein weiteres, interessantes Kapitel in der modernen Anthropometrie hoffen.

7.6 Zusammenfassung

Hinsichtlich der hohen Präzision und Genauigkeit ist das hier verwendete Vectra 5-pod 3D-Fotosystem für den klinischen Gebrauch empfehlenswert. Die hohe Auflösung von 360° Oberflächenaufnahmen bestimmter anatomischer Regionen dient der exakten Bestimmung von Landmarken und konsekutiven Vermessungen in den aufgenommenen Bereichen. Die genaue Ausrichtung der Patienten ist für eine qualitativ gute Aufnahme wesentlich. Die aufgenommenen Datensets sollten in jedem Fall sorgfältig geprüft werden in Bezug auf deren Vollständigkeit und Präzision. Die retrospektive, digitale Auswertung der Aufnahmen kann durch unterschiedliche Benutzer erfolgen.

8 Literaturverzeichnis

8.1 Textquellen

1. **Aldridge, K., S. A. Boyadjiev, G. T. Capone, V. B. DeLeon, and J. T. Richtsmeier.** 2005. Precision and error of three-dimensional phenotypic measures acquired from 3dMD photogrammetric images. *Am. J. Med. Genet. A* **138**:247–253.
2. **Al-Omari, I., D. T. Millett, A. Ayoub, M. Bock, A. Ray, D. Dunaway, and L. Crampin.** 2003. An appraisal of three methods of rating facial deformity in patients with repaired complete unilateral cleft lip and palate. *Cleft Palate Craniofac. J.* **40**:530–537.
3. **Ayoub, A. F., P. Siebert, K. F. Moos, D. Wray, C. Urquhart, and T. B. Niblett.** 1998. A vision-based three-dimensional capture system for maxillofacial assessment and surgical planning. *Br J Oral Maxillofac Surg* **36**:353–357.
4. **Ayoub, A., A. Garrahy, C. Hood, J. White, M. Bock, J. P. Siebert, R. Spencer, and A. Ray.** 2003. Validation of a vision-based, three-dimensional facial imaging system. *Cleft Palate Craniofac. J.* **40**:523–529.
5. **Bardouille, T., S. V. Krishnamurthy, S. G. Hajra, and R. C. N. D'Arcy.** 2012. Improved localization accuracy in magnetic source imaging using a 3-D laser scanner. *IEEE Trans Biomed Eng* **59**:3491–3497.
6. **Brügger, L. S.** 2010. Die Vermessung kraniofazialer anthropometrischer Bezugspunkte. Untersuchung zur Festlegung der Genauigkeit unter Einsatz des 3dMD-Fotosystems. Diss. Univ. Zürich, 2010. - Ref.: K.W. Grätz, Zürich.
7. **Burke, P. H., and L. F. Beard.** 1967. Stereo-photogrammetry of the face. *Rep Congr Eur Orthod Soc*:279–293.
8. **Christofides, E. A., and M. E. Steinmann.** 2010. A novel anthropometric chart for craniofacial surgery. *J Craniofac Surg* **21**:352–357.
9. **Duffy, S., J. H. Noar, R. D. Evans, and R. Sanders.** 2000. Three-dimensional analysis of the child cleft face. *Cleft Palate Craniofac. J.* **37**:137–144.
10. **Farkas LG.** 1994. *Anthropometry of the Head and Face*. New York: Raven Press.
11. **Farkas, L. G., and C. R. Forrest.** 2006. Changes in anthropometric values of paired craniofacial measurements of patients with right coronal synostosis. *Ann Plast Surg* **56**:427–430.
12. **Farkas, L. G., T. A. Hreczko, J. C. Kolar, and I. R. Munro.** 1985. Vertical and horizontal proportions of the face in young adult North American Caucasians: revision of neoclassical canons. *Plast. Reconstr. Surg.* **75**:328–338.
13. **Farkas, L. G., T. M. Hreczko, M. J. Katic, and C. R. Forrest.** 2003. Proportion indices in the craniofacial regions of 284 healthy North American white children between 1 and 5 years of age. *J Craniofac Surg* **14**:13–28.
14. **Farkas, L. G., and J. S. James.** 1977. Anthropometry of the face in lateral facial dysplasia: the unilateral form. *Cleft Palate J* **14**:193–199.
15. **Farkas, L. G., J. C. Kolar, and I. R. Munro.** 1985. Craniofacial disproportions in Apert's syndrome: an anthropometric study. *Cleft Palate J* **22**:253–265.
16. **Fearon, J. A., R. A. Ruotolo, and J. C. Kolar.** 2009. Single sutural craniosynostoses: surgical outcomes and long-term growth. *Plast. Reconstr. Surg.* **123**:635–642.
17. **Fitzpatrick, J. M., and J. B. West.** 2001. The distribution of target registration error in rigid-body point-based registration. *IEEE Trans Med Imaging* **20**:917–927.

18. **Hajeer, M. Y., A. F. Ayoub, D. T. Millett, M. Bock, and J. P. Siebert.** 2002. Three-dimensional imaging in orthognathic surgery: the clinical application of a new method. *Int J Adult Orthodon Orthognath Surg* **17**:318–330.
19. **Holler, W., G. Windischbauer, A. Cabaj, and G. Keck.** 1978. Moiré-Topographie zur Darstellung von Zahnoberflächen. *Biomedizinische Technik/Biomedical Engineering* **23**:430–431.
20. **Kau, C. H., A. Zhurov, R. Scheer, S. Bouwman, and S. Richmond.** 2004. The feasibility of measuring three-dimensional facial morphology in children. *Orthod Craniofac Res* **7**:198–204.
21. **Kobayashi, T., K. Ueda, K. Honma, H. Sasakura, K. Hanada, and T. Nakajima.** 1990. Three-dimensional analysis of facial morphology before and after orthognathic surgery. *J Cranio-maxillofac Surg* **18**:68–73.
22. **Kolar, J. C.** 1993. Methods in anthropometric studies. *Cleft Palate Craniofac. J.* **30**:429–431.
23. **Kolar, J. C.** 2011. An epidemiological study of nonsyndromal craniosynostoses. *J Craniofac Surg* **22**:47–49.
24. **Kolar, J. C., L. G. Farkas, and I. R. Munro.** 1985. Surface morphology in Treacher Collins syndrome: an anthropometric study. *Cleft Palate J* **22**:266–274.
25. **Kolar, J. C., E. M. Salter, and S. M. Weinberg.** 2010. Preoperative craniofacial dysmorphology in isolated sagittal synostosis: a comprehensive anthropometric evaluation. *J Craniofac Surg* **21**:1404–1410.
26. **Kovacs, L., A. Zimmermann, G. Brockmann, H. Baurecht, K. Schwenzer-Zimmerer, N. A. Papadopoulos, M. A. Papadopoulos, R. Sader, E. Biemer, and H. F. Zeilhofer.** 2006. Accuracy and precision of the three-dimensional assessment of the facial surface using a 3-D laser scanner. *IEEE Trans Med Imaging* **25**:742–754.
27. **Krimmel, M., S. Kluba, M. Bacher, K. Dietz, and S. Reinert.** 2006. Digital surface photogrammetry for anthropometric analysis of the cleft infant face. *Cleft Palate Craniofac. J.* **43**:350–355.
28. **Kusnoto, B., and C. A. Evans.** 2002. Reliability of a 3D surface laser scanner for orthodontic applications. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* **122**:342–348.
29. **Littlefield, T. R., K. M. Kelly, J. C. Cherney, S. P. Beals, and J. K. Pomatto.** 2004. Development of a new three-dimensional cranial imaging system. *J Craniofac Surg* **15**:175–181.
30. **Li, Z., J. Chen, and E. P. Baltsavias.** 2008. Advances in photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences. 2008 ISPRS congress book. International Society For Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) book series. CRC Press, Boca Raton (Fla.), London.
31. **Losken, A., H. Seify, D. D. Denson, A. A. Paredes, and G. W. Carlson.** 2005. Validating three-dimensional imaging of the breast. *Ann Plast Surg* **54**:471-6; discussion 477-8.
32. **Lübbers, H.-T., L. Medinger, A. L. Kruse, K. W. Grätz, J. A. Obwegeser, and F. Matthews.** 2012. The influence of involuntary facial movements on craniofacial anthropometry: a survey using a three-dimensional photographic system. *Br J Oral Maxillofac Surg* **50**:171–175.
33. **Lübbers, H.-T., L. Medinger, A. Kruse, K. W. Grätz, and F. Matthews.** 2010. Precision and accuracy of the 3dMD photogrammetric system in craniomaxillofacial application. *J Craniofac Surg* **21**:763–767.
34. **Luebbers, H.-T., P. Messmer, J. A. Obwegeser, R. A. Zwahlen, R. Kikinis, K. W. Graetz, and F. Matthews.** 2008. Comparison of different registration methods for surgical navigation in cranio-maxillofacial surgery. *J Craniomaxillofac Surg* **36**:109–116.
35. **Ma, L., T. Xu, and J. Lin.** 2009. Validation of a three-dimensional facial scanning system based on structured light techniques. *Comput Methods Programs Biomed* **94**:290–298.

36. **Marmulla, R., S. Hassfeld, T. Lüth, and J. Mühling.** 2003. Laser-scan-based navigation in cranio-maxillofacial surgery. *J Craniomaxillofac Surg* **31**:267–277.
37. **Marmulla, R., J. Mühling, G. Eggers, and S. Hassfeld.** 2005. Markerlose Registrierung der Patientenlage. Ein neues Verfahren zur bildgestützten Chirurgie der lateralen Schädelbasis. *HNO* **53**:148–154.
38. **Meintjes, E. M., T. S. Douglas, F. Martinez, C. L. Vaughan, L. P. Adams, A. Stekhoven, and D. Viljoen.** 2002. A stereo-photogrammetric method to measure the facial dysmorphology of children in the diagnosis of fetal alcohol syndrome. *Med Eng Phys* **24**:683–689.
39. **Metzler, P., W. Zemann, C. Jacobsen, K. W. Grätz, and J. A. Obwegeser.** 2013. Cranial vault growth patterns of plagiocephaly and trigonocephaly patients following fronto-orbital advancement: a long-term anthropometric outcome assessment. *J Craniomaxillofac Surg* **41**:e98-e103.
40. **Metzler, P., W. Zemann, C. Jacobsen, K. W. Grätz, and J. A. Obwegeser.** 2013. Postoperative cranial vault growth in premature sagittal craniosynostosis. *J Craniofac Surg* **24**:146–149.
41. **Ort, R.** 2012. Wiederhol- und Reproduzierbarkeit der anthropometrischen kraniofazialen Landmarkenbestimmung mit dem 3dMD-Fotosystem zwischen unterschiedlichen Untersuchern. Diss. Univ. Zürich, 2012. - Ref.: K.W. Grätz, Zürich.
42. **Ort, R., P. Metzler, A. L. Kruse, F. Matthews, W. Zemann, K. W. Grätz, and H.-T. Luebbers.** 2012. The Reliability of a Three-Dimensional Photo System- (3dMDface-) Based Evaluation of the Face in Cleft Lip Infants. *Plast Surg Int* **2012**:138090.
43. **Metzler, Philipp; Sun, Yi; Zemann, Wolfgang; Bartella, Alexander; Lehner, Marc; Obwegeser, Joachim Anton et al.** (2013): Validity of the 3D VECTRA photogrammetric surface imaging system for cranio-maxillofacial anthropometric measurements. In: *Oral Maxillofac Surg*.
44. **Singh, G. D., D. Levy-Bercowski, and P. E. Santiago.** 2005. Three-dimensional nasal changes following nasolabial molding in patients with unilateral cleft lip and palate: geometric morphometrics. *Cleft Palate Craniofac. J.* **42**:403–409.
45. **Weinberg, S. M., and J. C. Kolar.** 2005. Three-dimensional surface imaging: limitations and considerations from the anthropometric perspective. *J Craniofac Surg* **16**:847–851.
46. **Weinberg, S. M., S. Naidoo, D. P. Govier, R. A. Martin, A. A. Kane, and M. L. Marazita.** 2006. Anthropometric precision and accuracy of digital three-dimensional photogrammetry: comparing the Genex and 3dMD imaging systems with one another and with direct anthropometry. *J Craniofac Surg* **17**:477–483.
47. **Weinberg, S. M., N. M. Scott, K. Neiswanger, C. A. Brandon, and M. L. Marazita.** 2004. Digital three-dimensional photogrammetry: evaluation of anthropometric precision and accuracy using a Genex 3D camera system. *Cleft Palate Craniofac. J.* **41**:507–518.
48. **Wilbrand, J.-F., M. Wilbrand, J. Pons-Kuehnemann, J.-C. Blecher, P. Christophis, H.-P. Howaldt, and H. Schaaf.** 2011. Value and reliability of anthropometric measurements of cranial deformity in early childhood. *J Craniomaxillofac Surg* **39**:24–29.
49. **Wong, J. Y., A. K. Oh, E. Ohta, A. T. Hunt, G. F. Rogers, J. B. Mulliken, and C. K. Deutsch.** 2008. Validity and reliability of craniofacial anthropometric measurement of 3D digital photogrammetric images. *Cleft Palate Craniofac. J.* **45**:232–239.
50. **Zhang, X., Y. Li, and L. Zhu.** 2012. Color code identification in coded structured light. *Appl Opt* **51**:5340–5356.

9 Anhang

9.1 Messdaten Patient 1

Die Tabellen beinhalten die 10-fach Messungen der 21 unterschiedlichen Landmarken.

Messung 1				Messung 2			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.	Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-97.51	-62.39	39.68	1	-97.61	-61.98	39.70
2	-103.42	-38.68	42.40	2	-103.61	-38.68	41.95
3	-89.41	-52.27	94.40	3	-88.35	-52.13	95.51
4	-69.44	-56.11	105.96	4	-69.31	-56.12	106.06
5	-59.27	-46.43	120.84	5	-59.15	-47.68	120.59
6	-59.17	-55.49	118.72	6	-59.17	-55.84	118.66
7	-45.27	-57.31	113.87	7	-45.31	-57.09	113.86
8	-23.41	-54.07	114.08	8	-22.87	-54.14	114.00
9	16.43	-43.83	78.42	9	15.89	-43.90	78.50
10	11.68	-67.24	71.84	10	11.54	-67.05	71.53
11	-43.79	-74.21	116.56	11	-43.77	-74.12	116.61
12	-49.59	-78.17	119.57	12	-49.26	-78.22	118.95
13	-59.58	-81.28	117.68	13	-59.19	-81.22	117.90
14	-68.79	-77.13	115.27	14	-68.54	-77.13	115.40
15	-71.42	-73.70	110.25	15	-71.22	-74.22	109.08
16	-60.82	-74.97	125.94	16	-61.48	-74.61	125.74
17	-53.29	-92.42	113.09	17	-54.63	-92.55	112.86
18	-57.86	-93.15	110.98	18	-57.92	-93.14	110.98
19	-62.10	-92.44	110.81	19	-62.33	-92.22	110.85
20	-44.65	45.34	58.06	20	-45.69	45.40	57.73
21	-28.21	-30.17	-7.40	21	-28.62	-30.80	-7.53

Messung 3			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-97.57	-62.12	39.64
2	-103.54	-38.69	42.13
3	-88.21	-52.29	95.64
4	-69.39	-56.18	106.01
5	-59.79	-48.04	120.39
6	-59.58	-55.81	118.51
7	-45.24	-57.21	113.85
8	-21.64	-54.35	113.73
9	16.36	-44.17	78.63
10	11.32	-67.06	71.09
11	-43.70	-74.79	116.28
12	-49.75	-78.19	119.55
13	-59.41	-81.14	118.16
14	-68.85	-77.26	114.72
15	-71.28	-73.88	109.37
16	-61.12	-72.89	126.09
17	-53.66	-92.40	113.10
18	-58.16	-92.97	111.21
19	-62.60	-92.21	110.71
20	-44.39	45.51	58.48
21	-26.98	-30.10	-7.00

Messung 4			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-97.48	-62.44	39.74
2	-103.38	-38.80	42.69
3	-88.51	-52.16	95.30
4	-69.32	-56.08	106.05
5	-60.16	-49.17	120.03
6	-59.87	-55.54	118.43
7	-45.34	-57.03	113.87
8	-23.59	-54.03	114.13
9	15.20	-44.19	78.74
10	11.42	-66.59	71.34
11	-45.93	-74.34	119.55
12	-49.82	-78.19	119.67
13	-59.49	-81.10	118.29
14	-68.96	-77.19	115.00
15	-71.15	-74.35	109.19
16	-60.89	-72.78	126.16
17	-54.58	-92.29	113.10
18	-57.79	-93.03	111.24
19	-62.25	-92.30	110.84
20	-44.68	45.83	58.66
21	-26.72	-29.46	-6.91

Messung 5			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-97.55	-62.19	39.61
2	-103.33	-38.87	42.80
3	-88.58	-51.96	95.26
4	-69.31	-56.12	106.06
5	-59.44	-48.74	120.31
6	-59.38	-55.02	118.73
7	-45.31	-57.15	113.87
8	-22.75	-54.29	114.02
9	15.96	-44.16	78.65
10	11.14	-66.81	70.74
11	-43.75	-73.91	116.73
12	-49.70	-78.13	119.94
13	-59.57	-81.16	118.05
14	-68.68	-77.13	115.33
15	-71.27	-73.92	109.37
16	-61.58	-74.13	125.83
17	-53.59	-92.20	113.27
18	-57.66	-93.00	111.37
19	-62.39	-92.06	110.92
20	-44.33	45.61	58.64
21	-30.54	-29.91	-8.11

Messung 6			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-97.47	-62.50	39.64
2	-103.27	-38.80	43.03
3	-88.22	-52.06	95.70
4	-69.35	-56.03	106.01
5	-59.24	-49.58	120.17
6	-59.15	-55.26	118.76
7	-45.23	-57.09	113.84
8	-24.24	-53.87	114.36
9	16.31	-44.03	78.55
10	11.22	-67.14	70.90
11	-43.96	-74.68	116.30
12	-49.48	-78.16	119.53
13	-59.38	-81.16	118.12
14	-68.73	-77.10	115.41
15	-71.32	-74.25	110.29
16	-61.92	-73.93	125.65
17	-54.67	-92.58	112.81
18	-58.27	-93.00	111.11
19	-61.89	-92.36	110.96
20	-43.97	45.91	59.05
21	-28.66	-30.71	-7.54

Messung 7			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-97.48	-62.45	39.70
2	-103.63	-38.74	42.00
3	-88.16	-52.09	95.76
4	-69.42	-56.06	105.96
5	-59.75	-52.51	119.19
6	-59.73	-55.94	118.45
7	-45.40	-57.29	113.91
8	-25.15	-54.34	114.47
9	16.26	-44.00	78.54
10	11.37	-66.91	71.20
11	-44.10	-74.62	116.37
12	-49.40	-78.22	119.04
13	-59.26	-81.15	118.08
14	-68.74	-77.11	115.37
15	-71.42	-73.75	110.39
16	-61.65	-74.17	125.77
17	-55.69	-92.24	112.90
18	-58.32	-93.06	110.97
19	-62.45	-92.16	110.82
20	-43.90	46.04	59.16
21	-26.92	-29.94	-6.98

Messung 8			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-97.53	-62.30	39.49
2	-103.46	-38.84	42.58
3	-88.40	-51.97	95.49
4	-69.40	-56.09	105.98
5	-59.73	-51.69	119.46
6	-59.52	-56.22	118.50
7	-45.19	-57.02	113.82
8	-23.89	-53.95	114.22
9	15.16	-44.18	78.75
10	11.43	-66.66	71.34
11	-44.55	-74.22	116.81
12	-49.55	-78.23	119.12
13	-59.51	-81.23	117.88
14	-68.66	-77.25	114.81
15	-71.19	-74.24	109.27
16	-61.48	-74.43	125.80
17	-55.09	-92.52	112.79
18	-58.15	-93.13	110.91
19	-62.18	-92.35	110.84
20	-44.07	46.44	59.33
21	-30.76	-29.68	-8.17

Messung 9			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-97.44	-62.49	39.80
2	-103.32	-39.10	42.94
3	-88.16	-52.01	95.78
4	-69.31	-55.99	106.04
5	-59.47	-52.85	119.17
6	-59.45	-56.40	118.51
7	-45.21	-57.11	113.83
8	-25.16	-54.30	114.53
9	15.78	-43.92	78.52
10	11.41	-66.65	71.30
11	-44.61	-74.38	116.78
12	-50.06	-78.10	120.24
13	-59.67	-81.07	118.32
14	-68.62	-77.15	115.28
15	-71.33	-73.99	109.95
16	-61.17	-73.26	126.10
17	-55.03	-92.45	112.86
18	-57.92	-93.17	110.93
19	-62.28	-92.23	110.88
20	-43.91	46.23	59.29
21	-25.46	-29.71	-6.52

Messung 10			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-97.58	-62.13	39.74
2	-103.41	-39.00	42.79
3	-88.39	-52.12	95.47
4	-69.32	-56.07	106.05
5	-59.87	-50.50	119.79
6	-59.60	-55.15	118.62
7	-45.12	-57.21	113.82
8	-24.44	-53.76	114.69
9	15.83	-44.11	78.63
10	11.50	-66.88	71.45
11	-44.48	-74.49	116.66
12	-49.89	-78.11	120.10
13	-59.39	-81.22	117.96
14	-68.82	-77.16	115.15
15	-71.29	-73.95	109.57
16	-61.39	-73.82	125.93
17	-55.66	-92.45	112.72
18	-58.12	-93.08	111.02
19	-61.95	-92.45	110.85
20	-44.05	46.66	59.50
21	-27.52	-29.59	-7.17

9.1.1 Differenzen [mm] der Messbeträge zum Betrag der Mittelwertkoordinaten - Patient 1

Landmarke	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Messung 4	Messung 5	Messung 6	Messung 7	Messung 8	Messung 9	Messung 10	Mittelwert
1	0.04	0.08	0.06	0.06	0.05	0.04	0.05	0.05	0.07	0.02	0.05
2	0.11	0.10	0.10	0.00	0.02	0.03	0.05	0.04	0.14	0.13	0.07
3	0.02	0.01	0.07	0.03	0.08	0.02	0.04	0.03	0.03	0.01	0.03
4	0.00	0.02	0.05	0.00	0.02	0.03	0.02	0.00	0.05	0.00	0.02
5	0.52	0.37	0.16	0.08	0.13	0.05	0.40	0.31	0.38	0.22	0.26
6	0.08	0.01	0.04	0.01	0.17	0.14	0.10	0.16	0.22	0.12	0.10
7	0.08	0.00	0.01	0.01	0.03	0.05	0.15	0.11	0.05	0.05	0.06
8	0.20	0.34	0.70	0.14	0.28	0.12	0.59	0.04	0.63	0.41	0.35
9	0.17	0.16	0.17	0.08	0.11	0.02	0.01	0.07	0.15	0.04	0.10
10	0.68	0.31	0.03	0.16	0.48	0.13	0.05	0.11	0.15	0.12	0.22
11	0.47	0.48	0.43	2.66	0.50	0.39	0.32	0.04	0.04	0.05	0.54
12	0.02	0.60	0.03	0.14	0.28	0.09	0.48	0.36	0.63	0.47	0.31
13	0.17	0.18	0.06	0.17	0.05	0.02	0.05	0.08	0.24	0.06	0.11
14	0.08	0.07	0.24	0.02	0.07	0.14	0.12	0.26	0.02	0.02	0.10
15	0.32	0.36	0.29	0.26	0.28	0.58	0.45	0.24	0.20	0.11	0.31
16	0.33	0.25	0.41	0.49	0.14	0.03	0.14	0.23	0.21	0.00	0.22
17	0.34	0.02	0.22	0.03	0.24	0.03	0.25	0.12	0.11	0.24	0.16
18	0.08	0.06	0.09	0.01	0.03	0.08	0.03	0.03	0.08	0.00	0.05
19	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01
20	0.64	0.29	0.40	0.04	0.27	0.01	0.09	0.50	0.29	0.73	0.33
21	0.25	1.00	0.70	1.35	1.79	0.96	0.86	1.80	2.05	0.68	1.14

9.2 Messdaten Patient 2

Die Tabellen beinhalten die 10-fach Messungen der 21 unterschiedlichen Landmarken.

Messung 1				Messung 2			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.	Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-81.49	-28.03	-57.53	1	-81.73	-28.08	-56.90
2	-87.94	-7.97	-53.23	2	-87.99	-8.11	-53.27
3	-71.75	-13.01	8.19	3	-71.17	-13.60	8.55
4	-50.73	-17.37	17.59	4	-50.86	-17.42	17.49
5	-41.66	-8.70	35.20	5	-41.26	-9.54	34.87
6	-40.92	-16.69	31.90	6	-41.10	-15.87	32.00
7	-25.67	-18.86	25.08	7	-25.80	-18.39	25.12
8	-3.32	-19.20	25.91	8	-3.12	-19.34	25.75
9	38.76	-18.16	-15.37	9	38.69	-18.22	-15.32
10	30.47	-37.81	-22.90	10	30.54	-37.83	-22.58
11	-28.85	-41.34	34.67	11	-28.22	-41.49	32.91
12	-33.50	-43.39	37.86	12	-33.67	-43.49	37.54
13	-42.80	-45.44	36.22	13	-43.07	-46.06	35.88
14	-52.35	-41.32	32.42	14	-52.46	-41.14	32.80
15	-54.90	-39.57	27.79	15	-54.81	-39.29	26.69
16	-43.73	-35.27	44.07	16	-44.25	-35.48	44.09
17	-40.28	-57.77	37.63	17	-39.84	-57.77	37.65
18	-44.01	-58.65	36.58	18	-44.13	-59.02	36.29
19	-47.96	-57.21	35.31	19	-47.97	-57.28	35.29
20	-7.62	93.47	-54.14	20	-8.40	94.18	-54.72
21	-16.30	-16.05	-105.62	21	-16.14	-14.51	-105.96

Messung 3			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-81.84	-28.83	-55.76
2	-87.98	-8.37	-52.84
3	-72.04	-13.91	8.05
4	-50.75	-17.60	17.75
5	-41.54	-11.06	33.89
6	-41.52	-15.95	31.84
7	-25.49	-18.61	24.92
8	-3.10	-19.36	25.73
9	30.52	-37.91	-22.68
10	39.23	-18.29	-15.46
11	-28.47	-41.81	33.56
12	-33.81	-43.44	37.55
13	-43.46	-44.80	36.90
14	-52.31	-41.30	32.46
15	-54.90	-40.06	27.13
16	-43.98	-35.57	44.14
17	-40.06	-57.70	37.68
18	-43.85	-58.57	36.68
19	-47.85	-57.34	35.35
20	-8.03	94.29	-55.17
21	-17.88	-11.78	-107.17

Messung 4			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-82.00	-27.85	-56.33
2	-87.88	-8.19	-52.57
3	-71.59	-13.62	8.33
4	-50.84	-17.34	17.45
5	-41.25	-11.03	34.00
6	-41.27	-15.85	31.95
7	-25.77	-18.84	25.15
8	-3.48	-18.74	26.16
9	38.67	-18.14	-15.32
10	30.42	-38.26	-22.91
11	-28.18	-41.72	32.83
12	-33.61	-43.45	37.64
13	-43.32	-45.52	36.10
14	-52.19	-41.03	33.08
15	-54.91	-39.98	27.40
16	-44.03	-35.78	44.19
17	-39.95	-57.75	37.66
18	-44.35	-58.78	36.39
19	-47.83	-57.05	35.44
20	-8.27	94.18	-54.83
21	-18.52	-10.91	-107.62

Messung 5			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-81.82	-29.18	-55.96
2	-88.04	-8.46	-53.03
3	-71.62	-13.67	8.32
4	-50.70	-17.39	17.63
5	-41.70	-9.74	34.61
6	-40.96	-14.74	32.39
7	-25.81	-18.72	25.16
8	-3.38	-18.86	26.07
9	38.93	-18.26	-15.38
10	30.46	-37.80	-22.93
11	-29.24	-41.28	35.43
12	-33.61	-43.52	37.50
13	-42.87	-44.90	36.72
14	-51.68	-41.51	32.09
15	-54.84	-40.57	26.41
16	-43.79	-35.84	44.24
17	-40.27	-57.77	37.64
18	-43.79	-58.53	36.71
19	-47.23	-57.47	35.68
20	-8.25	94.08	-54.69
21	-17.62	-12.63	-106.87

Messung 6			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-81.85	-28.73	-56.22
2	-88.16	-8.17	-53.59
3	-71.71	-13.74	8.27
4	-50.69	-17.60	17.82
5	-41.13	-10.21	34.52
6	-40.87	-14.23	32.62
7	-25.48	-18.92	24.96
8	-2.83	-19.33	25.69
9	39.42	-18.32	-15.51
10	30.43	-37.98	-23.10
11	-28.61	-41.49	34.11
12	-33.60	-43.72	37.05
13	-43.45	-44.64	37.21
14	-52.13	-41.26	32.59
15	-54.89	-40.19	26.72
16	-44.16	-35.89	44.21
17	-40.86	-57.72	37.63
18	-43.92	-58.65	36.62
19	-47.14	-57.50	35.72
20	-8.33	93.94	-54.40
21	-15.17	-10.35	-106.54

Messung 7			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-81.83	-29.00	-55.81
2	-87.87	-8.83	-52.47
3	-71.66	-13.58	8.28
4	-50.69	-17.31	17.62
5	-40.66	-10.41	34.54
6	-40.76	-14.34	32.61
7	-25.66	-18.77	25.07
8	-3.27	-19.18	25.90
9	39.33	-18.29	-15.50
10	30.45	-37.96	-22.99
11	-28.42	-42.35	33.04
12	-34.11	-43.27	37.82
13	-43.33	-45.65	35.98
14	-52.27	-41.11	32.89
15	-54.93	-39.55	28.26
16	-44.42	-36.05	44.22
17	-39.97	-57.80	37.63
18	-43.43	-58.51	36.83
19	-46.97	-57.41	35.84
20	-8.37	93.96	-54.41
21	-17.27	-11.56	-107.03

Messung 8			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-81.77	-28.16	-56.74
2	-88.31	-8.38	-53.69
3	-71.44	-13.48	8.43
4	-50.79	-17.45	17.59
5	-40.79	-9.32	35.07
6	-40.95	-14.60	32.45
7	-25.40	-18.89	24.89
8	-3.28	-19.25	25.86
9	39.15	-18.20	-15.49
10	30.59	-38.14	-22.07
11	-28.75	-41.52	34.43
12	-33.76	-43.47	37.53
13	-42.90	-44.74	37.05
14	-52.54	-41.14	32.75
15	-54.90	-39.95	27.29
16	-44.22	-35.64	44.13
17	-39.93	-57.83	37.61
18	-43.82	-58.66	36.64
19	-47.68	-57.30	35.46
20	-8.52	93.94	-54.14
21	-15.94	-13.14	-106.20

Messung 9			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-81.88	-28.70	-56.01
2	-87.77	-8.77	-52.32
3	-71.41	-13.44	8.44
4	-50.90	-17.49	17.50
5	-40.99	-10.39	34.46
6	-41.00	-16.12	31.97
7	-25.25	-18.79	24.78
8	-3.03	-19.39	25.69
9	39.09	-18.52	-15.30
10	30.43	-38.08	-23.03
11	-28.72	-41.36	34.38
12	-33.85	-43.50	37.30
13	-42.88	-45.06	36.50
14	-52.46	-41.19	32.70
15	-54.89	-40.01	27.00
16	-44.41	-36.08	44.23
17	-39.89	-57.98	37.54
18	-43.90	-58.72	36.57
19	-47.48	-57.20	35.61
20	-8.20	93.92	-54.48
21	-16.18	-12.12	-106.52

Messung 10			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-81.81	-27.56	-56.99
2	-88.02	-8.87	-52.74
3	-71.53	-13.80	8.39
4	-50.80	-17.62	17.71
5	-40.95	-8.20	35.64
6	-40.79	-14.42	32.57
7	-25.74	-18.81	25.12
8	-3.33	-19.14	25.94
9	39.03	-18.92	-15.08
10	30.50	-38.07	-22.65
11	-29.69	-41.55	35.86
12	-34.05	-43.40	37.23
13	-42.83	-45.58	36.12
14	-53.03	-40.91	32.94
15	-54.88	-39.67	27.32
16	-44.27	-36.20	44.28
17	-39.78	-57.94	37.56
18	-43.77	-58.91	36.46
19	-47.62	-57.25	35.51
20	-8.22	94.03	-54.64
21	-19.09	-12.47	-107.43

9.2.1 Differenzen [mm] der Messbeträge zum Betrag der Mittelwertkoordinaten - Patient 2

Landmarke	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Messung 4	Messung 5	Messung 6	Messung 7	Messung 8	Messung 9	Messung 10	Mittelwert
1	0.26	0.11	0.21	0.05	0.03	0.01	0.15	0.08	0.09	0.09	0.11
2	0.05	0.12	0.08	0.32	0.07	0.44	0.33	0.63	0.50	0.06	0.26
3	0.03	0.38	0.46	0.01	0.04	0.13	0.06	0.16	0.19	0.01	0.15
4	0.07	0.03	0.07	0.03	0.08	0.03	0.12	0.00	0.08	0.11	0.06
5	0.49	0.11	0.00	0.16	0.32	0.08	0.39	0.15	0.19	0.16	0.21
6	0.15	0.10	0.35	0.19	0.10	0.16	0.22	0.10	0.07	0.20	0.16
7	0.12	0.01	0.21	0.22	0.19	0.04	0.07	0.15	0.36	0.17	0.15
8	0.06	0.01	0.02	0.00	0.01	0.09	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03
9	0.64	0.69	7.58	0.74	0.46	0.03	0.06	0.25	0.24	0.19	1.09
10	1.08	1.00	6.65	1.37	1.08	1.27	1.22	1.03	1.30	1.18	1.72
11	0.20	0.97	0.28	0.88	0.78	0.13	0.21	0.14	0.01	1.42	0.50
12	0.03	0.01	0.04	0.00	0.04	0.16	0.23	0.02	0.04	0.05	0.06
13	0.18	0.21	0.17	0.13	0.22	0.22	0.16	0.12	0.22	0.12	0.17
14	0.03	0.11	0.05	0.02	0.54	0.15	0.00	0.15	0.09	0.45	0.16
15	0.06	0.57	0.08	0.15	0.05	0.00	0.25	0.08	0.00	0.08	0.13
16	0.56	0.13	0.22	0.05	0.14	0.09	0.34	0.04	0.36	0.36	0.23
17	0.08	0.13	0.06	0.09	0.08	0.34	0.06	0.06	0.01	0.08	0.10
18	0.03	0.23	0.07	0.22	0.12	0.01	0.27	0.04	0.02	0.03	0.10
19	0.07	0.11	0.11	0.06	0.01	0.02	0.13	0.03	0.08	0.01	0.07
20	0.72	0.25	0.55	0.30	0.13	0.13	0.10	0.24	0.11	0.07	0.26
21	0.70	0.61	0.52	0.98	0.27	0.66	0.26	0.58	0.35	1.05	0.60

9.3 Messdaten Patient 3

Die Tabellen beinhalten die 10-fach Messungen der 21 unterschiedlichen Landmarken.

Messung 1				Messung 2			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.	Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-53.97	-23.59	17.49	1	-54.20	-23.07	17.13
2	-63.11	-2.09	20.86	2	-63.24	-1.48	20.18
3	-36.09	-17.68	76.02	3	-37.32	-17.40	75.24
4	-13.37	-19.97	83.05	4	-13.41	-20.03	83.01
5	-1.91	-14.16	96.96	5	-2.06	-13.73	97.25
6	-1.45	-20.58	94.14	6	-1.35	-20.79	94.10
7	12.94	-19.90	85.04	7	12.94	-20.05	85.21
8	36.62	-17.67	82.21	8	37.21	-17.54	81.88
9	72.69	-2.97	31.54	9	72.62	-2.66	31.75
10	62.41	-23.76	23.78	10	62.32	-23.99	23.50
11	13.29	-46.46	84.70	11	12.95	-46.65	85.27
12	8.93	-47.99	90.45	12	8.99	-48.11	89.90
13	-0.50	-51.24	89.42	13	-0.53	-51.50	89.14
14	-9.81	-47.33	89.24	14	-10.14	-47.29	89.32
15	-12.97	-45.84	83.05	15	-12.89	-45.54	84.27
16	0.26	-44.32	98.08	16	-0.36	-44.83	97.78
17	4.15	-64.24	86.27	17	3.98	-63.85	86.54
18	-0.16	-65.03	85.29	18	-0.15	-64.57	85.87
19	-4.33	-64.12	85.49	19	-3.94	-63.80	85.90
20	4.96	109.06	24.81	20	4.55	109.52	25.01
21	15.40	-11.40	-48.66	21	16.00	-8.33	-50.27

Messung 3			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-54.21	-23.01	17.15
2	-63.27	-1.44	20.08
3	-37.84	-17.16	74.70
4	-13.49	-20.35	83.01
5	-2.09	-15.36	96.16
6	-2.01	-20.51	94.04
7	12.90	-19.92	85.12
8	36.72	-17.54	82.36
9	72.71	-2.60	31.18
10	62.22	-23.52	23.20
11	12.84	-45.79	86.56
12	8.82	-47.93	90.92
13	-0.22	-50.75	90.58
14	-10.20	-47.35	89.06
15	-12.88	-45.31	84.36
16	-0.32	-44.58	97.97
17	3.32	-63.82	86.66
18	0.07	-64.97	85.39
19	-3.63	-63.96	85.93
20	4.17	108.39	25.59
21	15.33	-10.47	-49.18

Messung 4			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-54.12	-23.26	17.25
2	-62.88	-1.59	20.73
3	-36.75	-17.25	75.72
4	-13.52	-20.29	82.95
5	-1.17	-14.30	96.92
6	-1.07	-20.18	94.22
7	13.16	-20.01	84.91
8	36.60	-17.56	82.53
9	72.67	-2.75	31.42
10	62.41	-23.66	23.80
11	12.79	-45.55	86.85
12	8.97	-47.90	90.88
13	-0.17	-51.05	89.82
14	-9.87	-47.60	88.06
15	-12.90	-45.33	84.11
16	-0.27	-44.32	98.16
17	3.72	-63.91	86.58
18	0.17	-64.73	85.74
19	-3.27	-63.87	86.09
20	4.15	107.69	26.06
21	14.40	-10.53	-49.22

Messung 5			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-53.87	-23.65	17.79
2	-63.11	-1.59	20.43
3	-36.31	-17.31	75.96
4	-13.45	-20.13	82.99
5	-1.14	-15.85	95.96
6	-1.13	-20.65	94.13
7	12.97	-19.62	84.75
8	37.02	-17.62	81.90
9	72.86	-2.76	31.13
10	62.35	-23.73	23.63
11	13.04	-46.05	85.64
12	8.77	-48.23	89.69
13	-0.25	-51.27	89.38
14	-9.61	-47.52	88.52
15	-13.00	-45.19	83.12
16	-0.45	-44.52	98.04
17	3.41	-63.42	86.79
18	0.05	-64.56	85.90
19	-3.55	-63.80	86.03
20	4.02	107.88	25.89
21	14.93	-10.87	-48.99

Messung 6			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-54.02	-23.76	17.17
2	-63.32	-2.29	20.90
3	-37.24	-17.32	75.35
4	-13.43	-20.25	83.05
5	-2.34	-15.46	96.08
6	-2.26	-20.80	93.93
7	13.09	-20.30	85.28
8	36.92	-17.56	82.03
9	72.65	-2.76	31.57
10	62.64	-23.35	24.36
11	12.31	-46.08	89.04
12	8.84	-47.95	90.84
13	-0.40	-50.99	89.97
14	-9.88	-47.40	88.98
15	-12.90	-44.74	84.18
16	-0.19	-44.37	98.11
17	3.66	-64.00	86.56
18	-0.20	-64.80	85.61
19	-4.07	-63.76	85.86
20	3.67	108.22	25.63
21	14.30	-10.41	-49.30

Messung 7			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-54.07	-23.28	17.42
2	-63.25	-1.53	20.22
3	-37.01	-17.15	75.60
4	-13.45	-20.21	83.01
5	-2.46	-13.86	97.10
6	-2.13	-20.30	94.05
7	12.68	-19.54	84.97
8	36.74	-17.68	81.98
9	72.80	-2.83	31.27
10	62.26	-23.66	23.32
11	12.84	-46.29	86.36
12	8.85	-48.27	89.59
13	-0.44	-51.33	89.34
14	-9.94	-47.53	88.40
15	-13.09	-44.85	83.04
16	-1.18	-44.20	98.21
17	3.55	-63.93	86.60
18	-0.36	-64.75	85.69
19	-4.04	-63.73	85.90
20	3.97	107.36	26.23
21	14.23	-7.06	-51.08

Messung 8			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-53.97	-23.80	17.28
2	-63.04	-1.44	20.46
3	-37.04	-17.24	75.56
4	-13.32	-20.39	83.24
5	-2.52	-14.16	96.88
6	-1.95	-20.18	94.11
7	12.97	-19.88	84.99
8	36.70	-17.62	82.18
9	72.65	-2.71	31.57
10	62.46	-24.30	23.86
11	13.02	-45.99	85.76
12	9.21	-48.32	89.46
13	-0.46	-51.34	89.33
14	-10.02	-47.45	88.76
15	-12.71	-45.44	87.66
16	-0.26	-44.44	98.07
17	3.27	-64.02	86.59
18	-0.21	-64.80	85.61
19	-3.86	-63.95	85.82
20	3.64	107.77	25.83
21	15.00	-11.65	-48.54

Messung 9			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-54.08	-23.48	17.20
2	-62.91	-2.00	20.97
3	-36.17	-17.50	76.00
4	-13.61	-19.80	82.73
5	-2.25	-12.51	98.18
6	-1.88	-20.47	94.07
7	12.99	-20.09	85.18
8	36.58	-17.45	82.74
9	72.77	-3.29	31.73
10	62.64	-23.85	24.30
11	12.38	-45.73	88.61
12	9.04	-48.09	89.94
13	-0.51	-50.80	90.34
14	-9.68	-47.48	88.74
15	-13.04	-45.25	82.98
16	-0.49	-44.10	98.37
17	3.21	-64.08	86.57
18	0.39	-65.09	85.24
19	-2.95	-64.13	86.05
20	3.59	108.07	25.69
21	13.43	-11.39	-48.80

Messung 10			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-54.14	-23.27	17.15
2	-63.20	-1.41	20.22
3	-36.28	-17.60	75.93
4	-13.58	-19.97	82.77
5	-2.19	-13.68	97.27
6	-1.73	-20.67	94.07
7	12.84	-20.00	85.30
8	36.73	-17.66	82.04
9	72.58	-2.89	32.05
10	62.55	-23.81	24.11
11	13.15	-45.86	85.55
12	9.13	-48.08	89.96
13	-0.25	-51.22	89.42
14	-10.16	-47.34	89.12
15	-12.93	-45.01	83.83
16	-0.11	-44.11	98.30
17	3.72	-63.92	86.57
18	-0.06	-64.79	85.64
19	-3.89	-63.53	86.04
20	3.94	108.09	25.71
21	15.69	-10.22	-49.29

9.3.1 Differenzen [mm] der Messbeträge zum Betrag der Mittelwertkoordinaten - Patient 3

Landmarke	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Messung 4	Messung 5	Messung 6	Messung 7	Messung 8	Messung 9	Messung 10	Mittelwert
1	0.04	0.06	0.07	0.03	0.05	0.05	0.01	0.05	0.01	0.03	0.04
2	0.10	0.00	0.00	0.17	0.05	0.32	0.02	0.11	0.06	0.03	0.09
3	0.12	0.09	0.38	0.06	0.09	0.04	0.04	0.03	0.10	0.11	0.11
4	0.01	0.00	0.08	0.02	0.00	0.09	0.05	0.28	0.30	0.23	0.11
5	0.06	0.29	0.54	0.03	0.68	0.61	0.17	0.01	1.06	0.31	0.37
6	0.06	0.07	0.04	0.05	0.07	0.08	0.07	0.04	0.02	0.02	0.05
7	0.04	0.16	0.03	0.10	0.38	0.30	0.22	0.09	0.14	0.21	0.17
8	0.03	0.11	0.12	0.23	0.15	0.09	0.18	0.03	0.39	0.14	0.15
9	0.01	0.01	0.14	0.07	0.01	0.03	0.01	0.03	0.16	0.11	0.06
10	0.02	0.11	0.46	0.04	0.13	0.25	0.34	0.24	0.39	0.24	0.22
11	1.26	0.72	0.01	0.12	0.67	2.23	0.05	0.60	1.70	0.82	0.82
12	0.20	0.21	0.58	0.55	0.37	0.52	0.43	0.49	0.18	0.17	0.37
13	0.18	0.29	0.59	0.08	0.19	0.18	0.20	0.21	0.41	0.18	0.25
14	0.32	0.39	0.21	0.60	0.25	0.12	0.32	0.03	0.07	0.25	0.26
15	0.59	0.31	0.28	0.08	0.84	0.14	1.06	3.22	0.92	0.31	0.78
16	0.05	0.11	0.04	0.03	0.00	0.00	0.02	0.01	0.12	0.06	0.05
17	0.04	0.05	0.00	0.00	0.12	0.04	0.02	0.06	0.08	0.01	0.04
18	0.11	0.08	0.07	0.06	0.09	0.01	0.04	0.00	0.11	0.02	0.06
19	0.17	0.04	0.07	0.13	0.05	0.09	0.08	0.01	0.25	0.09	0.10
20	0.68	1.15	0.17	0.40	0.26	0.00	0.69	0.40	0.14	0.10	0.40
21	0.23	0.88	0.03	0.18	0.18	0.16	0.97	0.40	0.65	0.20	0.39

9.4 Messdaten Patient 4

Die Tabellen beinhalten die 10-fach Messungen der 21 unterschiedlichen Landmarken.

Messung 1				Messung 2			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.	Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-59.21	-36.15	-59.61	1	-59.23	-36.21	-59.51
2	-68.81	-16.04	-53.79	2	-68.96	-15.37	-54.02
3	-33.61	-26.64	-0.92	3	-34.17	-26.68	-1.03
4	-12.64	-26.97	-0.36	4	-12.54	-27.16	-0.22
5	3.15	-18.46	10.53	5	2.64	-18.53	10.55
6	3.00	-24.47	8.81	6	2.17	-24.43	8.83
7	16.95	-25.41	-1.30	7	17.24	-25.24	-1.63
8	37.31	-22.58	-6.40	8	37.56	-22.62	-6.40
9	64.92	-8.66	-59.49	9	64.53	-8.95	-59.08
10	56.68	-31.27	-64.85	10	56.86	-31.12	-64.51
11	19.65	-45.81	2.22	11	19.41	-46.74	2.11
12	15.06	-48.31	5.77	12	15.61	-48.25	5.76
13	5.85	-51.17	6.32	13	5.53	-51.04	6.58
14	-4.69	-49.48	7.61	14	-5.02	-49.59	7.36
15	-9.65	-47.55	5.46	15	-9.60	-47.71	5.52
16	5.16	-44.60	14.57	16	5.59	-44.76	14.43
17	12.19	-61.59	1.37	17	11.52	-61.84	1.38
18	5.80	-63.05	1.65	18	6.34	-62.84	1.84
19	-0.74	-62.53	1.67	19	0.70	-62.42	1.78
20	-10.58	86.40	-81.52	20	-11.11	85.78	-80.33
21	-3.23	-32.13	-125.55	21	-2.35	-33.95	-124.99

Messung 3			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-59.22	-36.66	-59.13
2	-69.13	-16.13	-53.97
3	-33.59	-26.64	-0.91
4	-12.17	-27.17	0.08
5	1.98	-19.07	10.39
6	2.38	-26.05	8.75
7	16.91	-25.10	-1.35
8	36.47	-22.41	-6.24
9	64.72	-7.65	-59.79
10	56.85	-30.95	-64.65
11	19.09	-45.58	3.44
12	15.05	-48.32	5.76
13	5.28	-50.95	6.78
14	-4.77	-49.36	7.87
15	-10.06	-47.13	4.90
16	5.30	-44.59	14.53
17	9.91	-61.46	2.00
18	5.85	-62.53	2.12
19	0.87	-61.94	2.25
20	-12.03	84.98	-81.60
21	-2.28	-34.15	-124.93

Messung 4			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-59.17	-36.60	-59.47
2	-68.86	-15.74	-53.89
3	-33.91	-26.59	-0.95
4	-12.49	-27.21	-0.16
5	2.75	-18.26	10.64
6	2.83	-24.59	8.80
7	17.12	-25.41	-1.49
8	37.21	-22.72	-6.33
9	64.65	-7.97	-59.52
10	56.76	-31.10	-64.78
11	19.06	-45.59	3.49
12	15.06	-48.06	6.22
13	5.73	-51.05	6.51
14	-4.75	-49.55	7.44
15	-10.26	-47.03	4.60
16	5.51	-44.12	14.50
17	10.67	-61.49	1.81
18	6.19	-62.47	2.19
19	0.61	-61.88	2.27
20	-11.69	85.67	-82.67
21	-2.86	-34.26	-124.87

Messung 5			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-59.21	-36.58	-59.33
2	-68.70	-16.00	-53.68
3	-33.65	-26.72	-0.92
4	-12.46	-27.30	-0.08
5	2.11	-20.79	9.79
6	2.09	-26.02	8.74
7	17.47	-25.59	-1.62
8	37.20	-22.80	-6.27
9	64.50	-7.84	-59.49
10	56.27	-32.00	-64.92
11	19.30	-45.95	3.08
12	15.17	-48.24	5.87
13	5.57	-51.28	6.21
14	-4.56	-49.85	6.38
15	-9.54	-47.84	5.52
16	5.21	-44.02	14.58
17	11.69	-61.59	1.50
18	6.05	-62.99	1.71
19	-0.75	-62.30	1.85
20	-11.45	85.65	-81.31
21	-3.03	-33.35	-125.17

Messung 6			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-59.23	-36.08	-59.50
2	-68.97	-15.50	-54.04
3	-33.84	-26.72	-0.94
4	-12.01	-27.39	0.28
5	2.56	-19.16	10.33
6	2.91	-25.31	8.79
7	17.22	-25.52	-1.51
8	37.73	-22.80	-6.31
9	64.20	-7.65	-59.21
10	56.70	-31.59	-64.37
11	19.39	-44.88	2.66
12	14.89	-48.14	6.12
13	5.65	-50.75	7.14
14	-4.66	-49.43	7.70
15	-10.16	-47.28	4.73
16	5.55	-44.59	14.45
17	11.37	-61.65	1.56
18	6.12	-62.73	1.96
19	1.04	-62.20	2.02
20	-11.70	85.53	-82.07
21	-2.59	-34.61	-124.76

Messung 7			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-59.11	-36.82	-59.37
2	-69.14	-14.80	-54.50
3	-34.63	-27.03	-1.32
4	-11.96	-27.31	0.31
5	2.39	-17.82	10.82
6	2.43	-24.17	8.86
7	16.89	-24.99	-1.36
8	37.32	-22.76	-6.31
9	64.16	-7.66	-59.14
10	56.67	-31.49	-64.61
11	19.05	-45.45	3.47
12	15.09	-48.20	5.97
13	5.48	-50.93	6.77
14	-4.85	-49.59	7.35
15	-9.84	-47.04	5.23
16	5.09	-44.51	14.60
17	10.83	-61.79	1.61
18	6.20	-62.65	2.04
19	0.87	-62.26	1.95
20	-12.01	85.31	-82.69
21	-2.32	-33.10	-125.30

Messung 8			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-59.11	-36.68	-59.61
2	-69.00	-15.53	-54.09
3	-33.49	-26.70	-0.90
4	-12.62	-27.05	-0.33
5	2.83	-18.69	10.47
6	2.88	-24.84	8.80
7	17.15	-25.46	-1.49
8	37.17	-22.51	-6.39
9	64.35	-7.54	-59.53
10	56.92	-31.16	-64.25
11	19.46	-45.55	2.67
12	15.46	-48.12	6.03
13	5.75	-50.68	7.31
14	-4.95	-49.36	7.87
15	-9.99	-46.56	5.05
16	5.11	-43.58	14.56
17	10.47	-61.85	1.66
18	5.92	-63.06	1.64
19	-0.38	-62.51	1.67
20	-11.31	85.83	-81.39
21	-2.39	-34.41	-124.83

Messung 9			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-59.24	-36.43	-59.38
2	-68.98	-14.69	-54.15
3	-34.11	-27.32	-1.10
4	-12.33	-27.43	0.09
5	2.39	-19.00	10.41
6	2.60	-24.64	8.80
7	17.31	-25.40	-1.61
8	37.39	-22.77	-6.31
9	64.21	-7.31	-59.38
10	56.64	-31.68	-64.41
11	19.27	-45.90	3.15
12	14.93	-48.15	6.08
13	5.46	-51.10	6.50
14	-4.82	-49.38	7.84
15	-10.11	-47.79	4.69
16	5.48	-44.80	14.44
17	9.97	-61.63	1.90
18	5.21	-62.68	1.95
19	0.33	-62.03	2.10
20	-11.74	85.41	-81.86
21	1.04	-32.89	-125.44

Messung 10			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-59.22	-36.35	-59.52
2	-69.00	-14.85	-54.17
3	-34.44	-26.89	-1.20
4	-12.36	-27.55	0.15
5	2.17	-17.85	10.82
6	2.31	-24.51	8.82
7	17.16	-25.42	-1.51
8	38.12	-23.04	-6.19
9	64.22	-7.38	-59.36
10	56.96	-31.47	-63.73
11	19.05	-45.35	3.45
12	15.49	-48.40	5.52
13	5.47	-50.72	7.22
14	-4.73	-49.41	7.76
15	-10.41	-46.57	4.38
16	5.84	-43.58	14.45
17	10.98	-61.74	1.61
18	6.17	-62.84	1.85
19	0.68	-62.35	1.84
20	-11.56	85.65	-81.91
21	-1.13	-33.68	-125.16

9.4.1 Differenzen [mm] der Messbeträge zum Betrag der Mittelwertkoordinaten - Patient 4

Landmarke	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Messung 4	Messung 5	Messung 6	Messung 7	Messung 8	Messung 9	Messung 10	Mittelwert
1	0.00	0.04	0.10	0.06	0.01	0.08	0.04	0.14	0.03	0.02	0.05
2	0.16	0.02	0.22	0.11	0.31	0.02	0.32	0.08	0.04	0.02	0.13
3	0.36	0.11	0.38	0.16	0.28	0.13	0.69	0.42	0.46	0.45	0.34
4	0.14	0.01	0.15	0.01	0.09	0.02	0.11	0.07	0.15	0.27	0.10
5	0.15	0.15	0.18	0.32	1.45	0.28	0.65	0.02	0.16	0.64	0.40
6	0.36	0.47	1.04	0.27	0.99	0.42	0.68	0.02	0.25	0.38	0.49
7	0.07	0.03	0.35	0.03	0.39	0.18	0.44	0.09	0.14	0.06	0.18
8	0.08	0.15	0.90	0.11	0.08	0.37	0.01	0.24	0.07	0.81	0.28
9	0.48	0.05	0.44	0.25	0.10	0.33	0.40	0.01	0.24	0.23	0.25
10	0.17	0.01	0.02	0.12	0.23	0.04	0.07	0.14	0.02	0.38	0.12
11	0.23	0.98	0.13	0.13	0.27	0.71	0.27	0.07	0.21	0.36	0.34
12	0.03	0.14	0.04	0.15	0.02	0.14	0.04	0.00	0.12	0.22	0.09
13	0.18	0.05	0.04	0.07	0.24	0.15	0.04	0.18	0.09	0.19	0.12
14	0.02	0.09	0.09	0.04	0.17	0.05	0.07	0.07	0.07	0.06	0.07
15	0.28	0.43	0.11	0.19	0.55	0.04	0.20	0.66	0.52	0.63	0.36
16	0.26	0.42	0.25	0.17	0.27	0.26	0.18	0.71	0.45	0.66	0.36
17	0.15	0.27	0.36	0.21	0.06	0.06	0.10	0.10	0.19	0.08	0.16
18	0.24	0.09	0.26	0.28	0.20	0.04	0.11	0.26	0.17	0.07	0.17
19	0.29	0.18	0.29	0.35	0.05	0.03	0.02	0.26	0.21	0.11	0.18
20	0.33	0.88	0.50	0.70	0.28	0.18	0.48	0.11	0.04	0.15	0.36
21	0.07	0.02	0.03	0.05	0.01	0.07	0.05	0.05	0.12	0.05	0.05

9.5 Messdaten Patient 5

Die Tabellen beinhalten die 10-fach Messungen der 21 unterschiedlichen Landmarken.

Messung 1				Messung 2			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.	Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-55.17	-43.23	-55.94	1	-55.18	-43.84	-56.13
2	-63.11	-23.26	-53.41	2	-63.41	-23.18	-53.95
3	-37.95	-38.31	7.30	3	-38.20	-38.45	7.16
4	-18.07	-42.17	13.41	4	-18.09	-42.50	13.65
5	-6.41	-36.29	27.82	5	-6.80	-39.32	26.20
6	-6.57	-42.64	25.54	6	-6.98	-42.38	25.45
7	9.11	-43.74	17.45	7	8.75	-43.45	17.86
8	29.41	-43.31	15.52	8	29.33	-43.28	15.60
9	70.78	-31.43	-31.51	9	70.44	-31.88	-31.06
10	59.86	-53.13	-35.02	10	59.92	-53.02	-34.63
11	6.00	-64.68	23.53	11	5.91	-65.40	23.46
12	0.84	-68.47	26.85	12	0.66	-68.34	26.91
13	-7.93	-69.22	25.49	13	-8.11	-69.02	25.76
14	-17.12	-67.15	24.90	14	-17.02	-67.06	25.02
15	-20.45	-65.13	18.99	15	-20.45	-64.74	19.05
16	-8.87	-61.38	34.96	16	-9.27	-61.25	34.89
17	-4.32	-81.60	23.18	17	-4.55	-81.53	23.24
18	-8.08	-82.60	22.49	18	-8.20	-82.57	22.51
19	-12.09	-81.83	21.69	19	-11.82	-81.71	21.92
20	0.69	75.87	-50.04	20	0.80	75.30	-50.36
21	18.91	-16.20	-105.00	21	22.66	-12.08	-104.47

Messung 3			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-55.17	-43.09	-56.61
2	-63.25	-23.30	-53.63
3	-38.35	-38.39	7.20
4	-18.02	-41.74	12.97
5	-6.78	-39.57	26.11
6	-7.17	-42.66	25.40
7	8.70	-43.77	17.92
8	29.01	-43.41	15.48
9	70.23	-31.56	-30.98
10	59.93	-53.08	-34.38
11	6.01	-64.73	23.48
12	0.90	-68.30	27.33
13	-8.14	-69.01	25.78
14	-16.69	-67.09	24.80
15	-20.41	-63.87	19.12
16	-9.23	-61.46	34.90
17	-4.85	-81.52	23.26
18	-8.24	-82.72	22.33
19	-11.59	-81.80	21.97
20	0.58	75.13	-50.41
21	17.64	-13.11	-105.90

Messung 4			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-55.19	-44.26	-56.16
2	-63.50	-23.36	-54.00
3	-38.36	-38.49	7.12
4	-18.00	-42.17	13.47
5	-7.11	-39.64	25.98
6	-7.23	-42.28	25.37
7	8.80	-43.82	17.81
8	28.85	-43.34	15.66
9	70.93	-31.39	-31.64
10	59.93	-53.08	-34.36
11	5.27	-65.35	26.28
12	0.31	-67.99	27.88
13	-7.99	-68.74	26.34
14	-16.81	-67.16	24.72
15	-20.41	-64.73	19.23
16	-9.28	-61.64	34.85
17	-4.73	-81.40	23.33
18	-8.34	-82.47	22.61
19	-11.88	-81.38	22.06
20	0.85	75.18	-50.43
21	20.51	-19.00	-103.92

Messung 5			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-55.17	-43.55	-56.35
2	-63.16	-23.42	-53.40
3	-38.40	-38.26	7.30
4	-18.37	-42.81	13.64
5	-7.30	-38.48	26.38
6	-7.66	-41.43	25.30
7	8.69	-43.91	18.02
8	29.09	-43.58	15.36
9	70.65	-31.33	-31.33
10	59.93	-53.18	-34.14
11	6.12	-65.07	23.00
12	0.53	-68.02	28.02
13	-8.24	-68.78	26.24
14	-16.93	-67.29	24.57
15	-20.44	-64.91	19.09
16	-9.39	-61.43	34.87
17	-4.79	-81.43	23.31
18	-8.31	-82.58	22.49
19	-11.71	-81.66	22.00
20	1.19	75.18	-50.34
21	16.87	-11.60	-106.24

Messung 6			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-55.16	-44.10	-57.13
2	-63.45	-23.48	-53.83
3	-38.30	-38.64	7.01
4	-18.25	-42.52	13.53
5	-7.11	-37.97	26.70
6	-7.16	-41.18	25.50
7	8.73	-43.93	17.97
8	29.16	-43.31	15.61
9	70.84	-31.41	-31.57
10	59.97	-52.91	-34.31
11	5.62	-64.93	25.03
12	0.91	-68.19	27.69
13	-8.19	-69.02	25.76
14	-16.96	-67.31	24.54
15	-20.49	-64.89	18.87
16	-9.08	-61.48	34.93
17	-4.96	-81.31	23.40
18	-8.00	-82.51	22.62
19	-11.53	-81.73	22.05
20	0.71	75.68	-50.15
21	17.78	-18.69	-104.81

Messung 7			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-55.18	-44.23	-56.92
2	-63.22	-23.37	-53.52
3	-38.24	-38.42	7.18
4	-18.16	-42.62	13.68
5	-7.14	-38.23	26.55
6	-7.48	-41.34	25.38
7	8.60	-43.80	18.08
8	29.11	-43.36	15.54
9	70.42	-31.32	-31.04
10	59.97	-52.85	-34.41
11	6.21	-65.27	22.67
12	0.87	-68.21	27.59
13	-8.23	-69.13	25.55
14	-16.98	-67.19	24.76
15	-20.34	-64.93	19.74
16	-9.39	-61.40	34.87
17	-4.54	-81.41	23.31
18	-8.26	-82.52	22.56
19	-11.73	-81.64	22.00
20	0.89	75.54	-50.24
21	14.97	-20.38	-105.02

Messung 8			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-55.18	-43.81	-56.34
2	-63.29	-23.42	-53.61
3	-38.05	-38.74	7.02
4	-18.12	-42.62	13.72
5	-6.56	-37.11	27.31
6	-6.85	-41.12	25.61
7	8.42	-43.61	18.25
8	29.26	-43.20	15.76
9	70.54	-31.44	-31.10
10	59.94	-53.12	-34.09
11	5.57	-65.36	25.21
12	0.93	-68.31	27.36
13	-8.28	-68.71	26.40
14	-16.96	-67.22	24.71
15	-20.53	-64.64	18.77
16	-9.14	-61.70	34.88
17	-4.45	-81.40	23.30
18	-8.15	-82.59	22.49
19	-11.90	-81.68	21.89
20	0.96	75.33	-50.33
21	15.03	-22.12	-104.56

Messung 9			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-55.18	-43.56	-56.23
2	-63.41	-23.20	-53.95
3	-38.51	-38.46	7.13
4	-18.07	-42.39	13.58
5	-7.00	-37.30	27.06
6	-7.43	-40.98	25.46
7	8.73	-43.93	17.96
8	29.07	-43.10	16.00
9	70.81	-31.43	-31.54
10	59.92	-53.10	-34.46
11	5.81	-64.82	24.10
12	0.73	-68.31	27.08
13	-8.35	-69.10	25.61
14	-16.61	-67.10	24.75
15	-20.48	-64.35	18.96
16	-9.27	-61.35	34.90
17	-4.71	-81.37	23.35
18	-8.23	-82.52	22.57
19	-12.23	-81.54	21.79
20	0.84	75.35	-50.34
21	18.17	-23.44	-103.53

Messung 10			
Landmarke	x-Koord.	y-Koord.	z-Koord.
1	-55.19	-44.41	-57.13
2	-63.37	-23.35	-53.78
3	-38.12	-38.41	7.20
4	-18.13	-42.42	13.55
5	-7.35	-37.25	26.99
6	-7.59	-41.15	25.38
7	8.73	-44.00	18.01
8	29.05	-43.23	15.78
9	70.47	-31.27	-31.06
10	59.95	-53.00	-34.28
11	5.65	-65.10	24.94
12	0.86	-68.35	27.16
13	-7.94	-69.11	25.62
14	-17.15	-67.16	24.90
15	-20.65	-64.73	18.47
16	-9.18	-61.73	34.86
17	-4.44	-81.51	23.25
18	-8.14	-82.78	22.28
19	-11.63	-81.66	22.04
20	0.95	75.59	-50.19
21	18.87	-23.78	-103.26

9.5.1 Differenzen [mm] der Messbeträge zum Betrag der Mittelwertkoordinaten - Patient 5

Landmarken	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Messung 4	Messung 5	Messung 6	Messung 7	Messung 8	Messung 9	Messung 10	Mittelwert
1	0.63	0.21	0.28	0.02	0.22	0.53	0.48	0.09	0.29	0.70	0.34
2	0.36	0.18	0.11	0.32	0.29	0.21	0.18	0.06	0.19	0.09	0.20
3	0.29	0.04	0.03	0.09	0.01	0.14	0.02	0.05	0.18	0.12	0.10
4	0.25	0.11	0.77	0.26	0.49	0.15	0.25	0.26	0.02	0.03	0.26
5	0.88	0.68	0.84	0.87	0.16	0.10	0.03	0.52	0.45	0.48	0.50
6	0.74	0.53	0.77	0.44	0.24	0.42	0.31	0.46	0.58	0.45	0.50
7	0.16	0.33	0.03	0.01	0.13	0.13	0.03	0.11	0.13	0.22	0.13
8	0.12	0.07	0.03	0.12	0.11	0.00	0.00	0.02	0.10	0.06	0.06
9	0.22	0.06	0.39	0.39	0.01	0.29	0.30	0.13	0.26	0.27	0.23
10	0.25	0.06	0.01	0.00	0.03	0.10	0.09	0.07	0.05	0.07	0.07
11	0.57	0.07	0.54	0.98	0.37	0.16	0.28	0.62	0.26	0.28	0.41
12	0.01	0.09	0.03	0.06	0.02	0.06	0.04	0.04	0.06	0.01	0.04
13	0.07	0.00	0.00	0.07	0.04	0.01	0.04	0.04	0.04	0.01	0.03
14	0.07	0.00	0.12	0.05	0.04	0.06	0.03	0.03	0.15	0.09	0.06
15	0.39	0.04	0.74	0.07	0.21	0.15	0.38	0.10	0.33	0.06	0.25
16	0.09	0.19	0.01	0.13	0.03	0.00	0.06	0.17	0.10	0.20	0.10
17	0.10	0.06	0.07	0.03	0.00	0.08	0.04	0.05	0.05	0.03	0.05
18	0.01	0.01	0.09	0.07	0.00	0.06	0.04	0.00	0.04	0.12	0.05
19	0.14	0.04	0.10	0.23	0.00	0.05	0.02	0.02	0.10	0.00	0.07
20	0.25	0.06	0.17	0.11	0.16	0.14	0.08	0.04	0.02	0.10	0.11
21	0.16	0.18	0.41	0.14	0.44	0.19	0.27	0.17	0.06	0.12	0.21